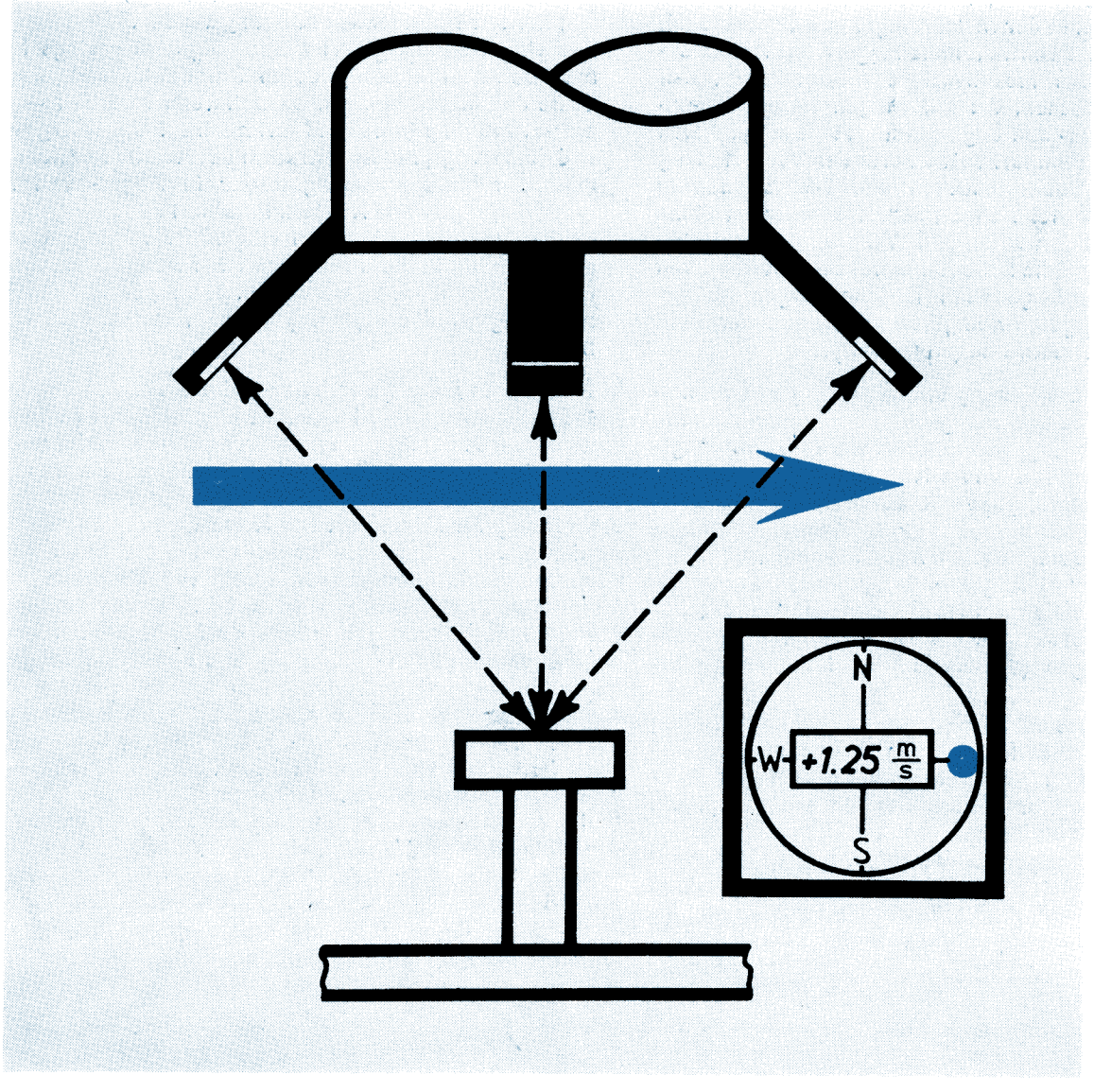
mst

5

1988

VEB
Ammendorfer
Plastwerk
Wissenschaftliche
Bibliothek - PSF 10
Halle - 4073

messen·steuern·regeln



VEB
Verlag Technik
Berlin
EVP: 4,-M

Strömungsmeßtechnik

Der Wissenschaftsbereich Allgemeine Elektrotechnik der Sektion Technische Elektronik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock hatte vom 1. bis 3. September 1987 zu einem Seminar eingeladen, um Ergebnisse und Probleme zum Einsatz moderner Strömungs- und Durchflußmeßtechnik in Vorträgen und Laborversuchen vorzustellen und Anregungen für weitere Entwicklungsschritte zu geben. Der Einladung waren 80 Vertreter aus Industrie, Akademie und Hochschulwesen gefolgt, so daß ein breiter Gedanken- und Erfahrungsaustausch zustande kam.

Im Mittelpunkt standen moderne Meßverfahren, wie akustische, optische, korrelative, induktive, Wirbel-Verfahren, und als Vertreter der klassischen Durchflußmeßtechnik das Differenzdruckverfahren. In den Fachgesprächen wurde immer wieder auf den hohen Stellenwert und den Bedarf in der industriellen Meßtechnik, im aero- und hydrodynamischen Versuchswesen, in der Meteorologie und Ozeanologie, in der Medizin und im Umweltschutz hingewiesen. Besonderes Interesse galt den nichtinvasiven Meßmethoden, den akustischen und optischen, die seit einigen Jahren Gegenstand von Grundlagen- und angewandter Forschung speziell in Rostock sind. Die seminaristische Form der Veranstaltung mit Vorführungen, Laborversuchen und Diskussionen in Interessengruppen erwies sich als sehr fruchtbar im Sinne einer gegenseitigen Information und Weiterbildung.

Das Seminar bestätigte die hohe Aktualität der Thematik und die wachsende Nachfrage nach leistungsfähigen Meßgeräten für Strömungsgeschwindigkeiten (Anemometer) und für Volumen- und Massenströme (Flowmeter):

- in der Technik der Regelung und Steuerung von Prozessen, in denen Stoffe und Energien im fluidischen Zustand (flüssig oder gasförmig) transportiert werden. Strömungs- und Durchflußsensoren sind wichtige Führungselemente in der Automatisierungstechnik bedeutsamer Industriezweige, wie Energietechnik, Bergbau, Chemie, Nahrungsmittelindustrie, Wasserwirtschaft und Landtechnik. Sie informieren über Fließgeschwindigkeiten, Durchflußmengen, Flußverteilungen, Flußschwankungen, Turbulenzgrade und Turbulenztransport. Ihr Ausfall in großtechnischen Anlagen (blindes Fahren) kann zu großen Schäden führen.
- in der Diagnosetechnik, insbesondere zur Überprüfung von Kreislaufsystemen für Kühlung, Aufheizung, Schmierung oder Reinigung. Hier ist ein großer Bedarf an mobiler und eingriffsfreier Durchflußmeßtechnik entstanden. Die akustische Clamp-on-Technik (Anklemmen von Sende- und Empfangsschwinger an die Rohrwand) ist dafür gut geeignet. Sie vermeidet das Auftrennen der Rohrleitung und Einsetzen von Einbaumeßsystemen, was aufwendig und in vielen Fällen nicht möglich ist
- in der Erforschung der Geschwindigkeits-, Druck- und Widerstandsverhältnisse bei der Umströmung von Flugkörpern, Land- und Wasserfahrzeugen, Gebäuden und Brücken. Strömungsmessungen an Modellen in Wind- und Kavitationskanälen liefern wichtige Kenngrößen für Konstruktionen der Originale. Die Turbulenzforschung stellt hohe Anforderungen an die zeitliche und räumliche Auflösung. Ihr wird in hohem Maße die Laser-Doppler-Anemometrie gerecht, die kalibrierungs- und eingriffsfrei arbeitet. Sie tastet ein Strömungsfeld quasi punktförmig mit hoher Meßwertrate ab
- in der Meeresforschung, atmosphärischen Turbulenzforschung, in Umweltschutz und Medizin. Um die Bewegung von Nährstoffen und Sedimenten im Meer zu erfassen, sind empfindliche und möglichst autonom registrierende Strömungsmesser erforderlich. Integrierte Meßsysteme mit akustischen Meßstrecken, elektronischem Kompaß und interner elektronischer Koordinatentransformation haben einen hohen Entwicklungsstand erreicht und in Meeresmeßsonden Einsatz gefunden.

  Der Umweltschutz gebietet eine möglichst geringe Luft- und Gewässerbelastung durch Schadstoffe und Abprodukte aus Landwirtschaft, Industrie und Haushalt — ein ernstes Problem in den Industriezentren. Um Reinigungs- und Sanierungsprozesse wirksam überwachen zu können, müssen robuste Strömungsmesser in Abgas- und Abwasserleitungen und Kanälen installiert sein.

  In der Medizin geht es um eingriffsfreie Blutstrommessungen. Zum Standardverfahren hat sich die akustische Doppler-Meßmethode entwickelt. Sie registriert die Geschwindigkeit der Erythrozyten nach Richtung und Betrag.

Die genannten Beispiele weisen auf das breite Anwendungsfeld der Strömungs- und Durchflußmeßtechnik hin. In der Zukunft werden sicher die berührungsfreien Verfahren an Boden gewinnen. In welchem Umfang, hängt nicht nur von den technischen Ergebnissen sondern auch von der Preisentwicklung der Geräte ab. Die Kostenfrage spielt natürlich in der industriellen Meßtechnik eine wesentliche Rolle, insbesondere dort, wo eine Mehrzahl von Meßwertaufnehmern einen Prozeß zu überwachen hat. Leider ist dafür die attraktive berührungsfrei arbeitende Meßtechnik derzeitig noch zu teuer. Für die Forschung und technische Diagnose dagegen wiegen die meßtechnischen Vorzüge dieser modernen Meßtechnik weitaus mehr, da man hier mit Einzelgeräten auskommt und die Kostenfrage in Relation zur Erschließung von wissenschaftlichem Neuland bzw. zu den Gesamtkosten einer Instandsetzung steht.

In der abschließenden Auswertung des Seminars wurde von den Teilnehmern der Wunsch nach Publikation der Vorträge geäußert. Die Redaktion „messen · steuern · regeln" kam dankenswerterweise diesem Wunsch entgegen und stellte dafür das vorliegende Heft zur Verfügung. Somit wird die behandelte aktuelle Thematik einem breiten Fachpublikum zugänglich.

msr 8813 Prof. Dr. sc. nat. *O. Fiedler*, Leiter des Seminars

msr

messen·steuern·regeln

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift für die Automatisierungstechnik

Herausgeber:

Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der KDT

Redaktionsbeirat:
Dr. rer. nat. A. BORGWARDT, Prof. Dr. sc. techn. G. BRACK, Dipl.-Ing. H.-H. EHLERT, Prof. Dr. sc. techn. W. FRITZSCH, Prof. Dr. sc. techn. H. FUCHS, Dr. rer. nat. H. GENA, Dipl.-Ing. H. GOTTSCHALK, Dr.-Ing. K. HILSCHER, Prof. Dr.-Ing. habil. D. HOFMANN, Dr.-Ing. G. MEISTER, Dr.-Ing. J. MÜLLER, Prof. Dr. sc. techn. R. MÜLLER, Prof. Dr. sc. techn. P. NEUMANN, Prof. Dr.-Ing. S. PILZ, Prof. em. Dr. sc. techn. Dr.-Ing. E. h. K. REINISCH, Prof. Dr. sc. techn. W. RICHTER, Dr.-Ing. H. SCHULZE, Prof. Dr. sc. techn. H. TÖPFER, Prof. Dr. sc. oec. G. VIEHWEGER, Prof. Dr. sc. techn. W. WELLER, Prof. Dr. sc. techn. J. WERNSTEDT

Zum Titelbild:

Die abgebildete stilisierte Meßstrecke eines akustischen Strömungsmessers ermöglicht in Verbindung mit dem Meßsystem und einem elektronischen Kompaß die Bestimmung des Strömungsvektors in Gewässern, wie Seen und Flüssen, und im Meer. Verfahren und Gerätelösungen dazu werden in unserem Beitrag auf S. 212 vorgestellt.

Titelgrafik: G. SCHWESINGER

5
1988

31. Jahrgang
Mai 1988

ISSN 0026-0347

VEB
VERLAG TECHNIK
BERLIN

Aufsätze

O. Fiedler
Strömungs- und Durchflußmeßtechnik 194

O. Fiedler, K.-P. Schulz und *K. Christofori*
Geschwindigkeitsmessung mit CCD-Zeilenkamera nach dem Ortsfilterprinzip 205

J. Hilpert, A. Mitzkus, S. Heide und *O. Fiedler*
Ultraschall-Durchflußmessung nach der Clamp-on-Methode 209

J. Gätke
Akustische Strömungsgeschwindigkeits- und Durchflußmessung 212

H. Schlüter
Synchronisierte Kurzzeitintegration phasenempfindlich gleichgerichteter Signale 217

G. Urner
Korrelationsdurchflußmessung, ein Meßverfahren für schwierige Fluide 221

H. Gehlhaar
Durchflußmessungen nach Differenzdruckverfahren 224

K. Schilder
Wirbel-Durchflußmesser für die Automatisierungstechnik 228

W. Schmidt, O. Skerl und *O. Fiedler*
Akustische Doppler-Strömungsmessung 232

Buchbesprechungen 235
Leserinformation 236
Manuskripthinweise 237
Neue Bücher aus der UdSSR 240
Vorschau und Kurzinformationen 3. US.

O. Fiedler

Strömungs- und Durchflußmeßtechnik

0. Einleitung

Die gegenwärtige Entwicklung in der Strömungs- und Durchflußmeßtechnik zeigt einen schnellen Wechsel von Gerätetypen, große Aktivitäten auf dem patentrechtlichen Sektor und eine starke Hinwendung zu berührungsfreien Meßverfahren.

Die Autoren von [1] bemängeln, daß die Fachliteratur zu wenig auf diese Entwicklung reagiert. Moderne Meßverfahren würden zu knapp behandelt, dagegen Strömungs- und Durchflußmesser, die nach mechanischen Prinzipien arbeiten, sehr ausführlich. Bei einer Gesamteinschätzung ist allerdings zu bedenken, daß nach STROHRMANN [2] der Marktanteil der Durchflußmesser nach mechanischen Verfahren, Wirkdurchmesser, Volumenzähler und Schwebekörpermesser, auf insgesamt 75% geschätzt wird, während nur 25% auf moderne Verfahren, auf magnetisch induktive, Ultraschall-, thermische, Wirbelzähler-, Coriolis- und Korrelationsdurchflußmesser, entfallen. Die Verteilung verändert sich zugunsten dieser Verfahren, wenn nicht nur Durchflußmesser, sondern auch Geschwindigkeitsmesser Berücksichtigung finden, z. B. tauchende akustische und induktive Sonden, Laser-Doppler-Anemometer, optoelektronische Ortsfiltersysteme usw. Nachfolgend wird über einige Entwicklungen der letzten Jahre, vorzugsweise zur berührungsfreien Geschwindigkeits- und Durchflußmeßtechnik, berichtet. Dazu gehören induktive, akustische, thermische und optische Meßsysteme.

1. Magnetisch induktiver Durchflußmesser (IDM)

Das Prinzip der Durchflußmessung in einem Rohr zeigt Bild 1. Zwei Erregerspulen erzeugen senkrecht zur Strömungsrichtung ein Magnetfeld, in dem positive und negative Ladungsträger in der strömenden Flüssigkeit entgegengesetzt abgelenkt werden. Das skizzierte Volumenelement mit der darin entstehenden Feldstärke liefert einen Beitrag zur Meßspannung U_M, die an den Elektroden an der Rohrinnenwand abgegriffen wird. Sie ist die Summe aller Volumenbeiträge, die je nach Raumlage unterschiedliches Gewicht haben. Diese läßt sich für jeden Raumpunkt berechnen und ergibt die Wertigkeitsfunktion $W(x, y, z)$. Dann ist

$$U = \iiint W \cdot [v \times B] \, dx \cdot dy \cdot dz \,. \tag{1}$$

Die Integration über den Rohrinnenraum liefert bei radialsymmetrischer Rohrströmung und homogenem Magnetfeld eine Meßspannung zwischen den Elektroden

$$U_M \doteq 2 \cdot R \cdot B_y \cdot v_m \,. \tag{2}$$

R Rohrinnenradius; B_y Komponente der magnetischen Induktion senkrecht zur Rohrachse und Elektrodenverbindungslinie; v_m über den Querschnitt gemittelte Strömungsgeschwindigkeit

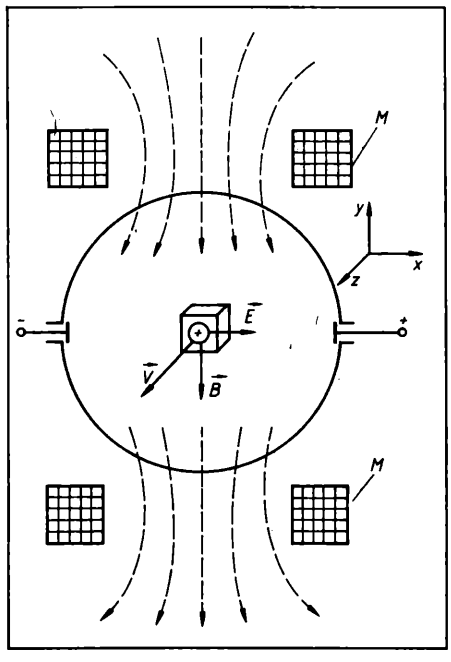


Bild 1. Magnetisch induktiver Durchflußmesser (Prinzip)
M Magnetspule; B magnetische Induktion; v Strömungsgeschwindigkeit; E induzierte elektrische Feldstärke

Der besondere Vorzug induktiver Durchflußmesser gegenüber Meßsystemen, die nur punkt- oder linienweise den Strömungsraum abtasten, erweist sich darin, daß er unabhängig vom Strömungsprofil (laminar oder turbulent) stets die über den Querschnitt gemittelte Strömungsgeschwindigkeit mißt. Der Volumenstrom ist dann

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot R \cdot U_M}{2 \cdot B_y} \,. \tag{3}$$

Außerdem ist das Ergebnis unabhängig von Temperatur, Dichte und Zähigkeit des Fluids.

Die radialsymmetrische Strömung ist nicht immer gegeben. Hinter Rohrkrümmern, Ventilen und Schiebern treten Nebenströmungen quer zur Hauptströmung auf. Sie liefern einen fehlerhaften Beitrag zur Meßspannung. Der Meßfehler kann klein gemacht werden, wenn ein inhomogenes Magnetfeld im Rohr zur Anwendung kommt, dessen räumliche Struktur invers zur Wertigkeitsfunktion verläuft (wertigkeitsinverses Magnetfeld). Da es jedoch keine exakte Lösungsmöglichkeit gibt, bleiben derartige Magnetfeldanpassungen grobe Näherungen [3]. So empfiehlt der Hersteller, vor dem Meßwandler stets eine Ausgleichsstrecke von mindestens 3 bis 5 Rohrdurchmessern einzuhalten.

1.1. Leitfähigkeit des Fluids

Das Meßprinzip verlangt Ladungsträger im Fluid — positive und negative Ionen. Petrochemikalien, wie Erdöl, Benzin und Dieseltreibstoff, sind nach dem induktiven Prinzip nicht meßbar. Als typischer Grenzwert gilt die Mindestleitfähigkeit von $\varkappa = 1$ µS/cm. Mit Hilfe der Beweglichkeit b von Ionen läßt sich daraus die Mindestkonzentration von Ionenpaaren je Volumen berechnen:

$$n = \frac{\varkappa}{e(b^- + b^+)} \,. \tag{4}$$

e Elementarladung

Prof. Dr. sc. nat. OTTO FIEDLER (56) studierte von 1952 bis 1957 Physik an der Universität Rostock. Von 1959 bis 1966 wissenschaftlicher Assistent am Institut für Experimentelle Kernphysik der TU Dresden, 1966 Promotion A zur Thematik Wirkungsquerschnitt von Fusionsreaktionen. Von 1966 bis 1973 wissenschaftlicher Mitarbeiter bzw. Dozent am Lehrstuhl für Festkörperphysik der Sektion Physik/Elektronische Bauelemente der TH Karl-Marx-Stadt. 1972 Promotion B zur Thematik Herstellung dünner Schichten durch Ionenzerstäubung. 1974 Berufung zum o. Professor für Theoretische Elektrotechnik an der Sektion Technische Elektronik der WPU Rostock. Dort Wissenschaftsbereichsleiter Allgemeine Elektrotechnik.

Tafel 1. Mindestionenkonzentrationen einiger Stoffe bei der Mindestleitfähigkeit $\varkappa = 1\ \mu S/cm$
b^+, b^- bei 18 °C

Kationen	b^+ $\times 10^{-4}$ cm²/Vs	Anionen	b^- $\times 10^{-4}$ cm²/Vs	n Ionenpaare/cm³
H^+	33	OH^-	18,2	$1{,}2 \cdot 10^{15}$
Na^+	4,6	Cl^-	6,9	$5{,}4 \cdot 10^{15}$
K^+	6,8	J^-	7,0	$4{,}5 \cdot 10^{15}$
Ag^+	5,7	NO_3^-	6,5	$5{,}1 \cdot 10^{15}$
Zn^{++}	4,8	SO_4^{--}	6,1	$5{,}7 \cdot 10^{15}$

Tafel 1 enthält Beweglichkeiten von Ionen bekannter Substanzen bei 18 °C. Die Dimension ergibt sich aus

$$v = b \cdot E. \tag{5}$$

v Geschwindigkeit; E Feldstärke

Die letzte Spalte enthält die Mindestkonzentration der Ionenpaare, sie liegt im Bereich von $1 \cdot 10^{15}$ cm^{-3} bis $5 \cdot 10^{15}$ cm^{-3}. Einfach destilliertes Wasser hat etwa diese Grenzwerte. Trinkwasser hat zwei Größenordnungen höhere Konzentrationen und ist gut meßbar. Das gilt auch für Lösungen mit Wasseranteilen größer als 1%, für Schlämme, Breie, beliebige Suspensionen und gasblasenbeladene Fluide.

1.2. Meßsysteme

Die Leistungsfähigkeit eines Meßsystems hängt wesentlich davon ab, wie gut Störspannungen, elektrochemische, transformatorische und Netzstörspannungen unterdrückt werden können, denn sie sind ein bis zwei Größenordnungen größer als die Meßspannung.

Meßwandler mit 50 Hz Wechselfeld:
Die elektrochemischen und transformatorischen Störspannungen sind recht gut eliminierbar. Dagegen verursachen unkorrelierte Netzstörspannungen erhebliche Nullpunktfehler. Sie verlangen eine Null-Durchfluß-Kompensation. Das gilt sowohl für Meßsysteme mit eintauchenden Elektroden als auch für solche mit elektrisch isolierten Oberflächen, d. h. mit kapazitivem Signalabgriff.

Tafel 2 zeigt einige Eigenschaften von 50 Hz Wechselfeldsystemen im Vergleich zu den heute bevorzugten Meßwandlern mit pulsierendem Gleichfeld.

Meßwandler mit pulsierendem Gleichfeld (Pulsfrequenz = ganzzahlig geteilte Netzfrequenz):

Sie haben keine transformatorischen Störspannungen und eliminieren automatisch elektrochemische wie auch unkorrelierte Netzstörspannungen und erreichen höhere Genauigkeiten bei wesentlich kleinerem Leistungsaufwand (10% gegenüber Wechselfeldbetrieb).

Bild 2 zeigt einen Vergleich der Meßfehlergrenzen bei beiden Betriebsarten.

Tafel 2. Vergleich einiger Merkmale induktiver Durchflußmesser mit 50 Hz-Wechselfeld und pulsierendem Gleichfeld

	50 Hz-Wechselfeld		pulsierendes Gleichfeld
	nicht isolierte Elektroden	isolierte Elektroden	nicht isolierte Elektroden
Rohrnennweiten mm	5 ... 1000	50 ... 500	5 ... 1000
Volumenstrom m³/h [1])	0,018 ... $28 \cdot 10^3$	1,7 ... $7 \cdot 10^3$	0,018 ... $28 \cdot 10^3$
Leistungsaufnahme VA (abhängig von Nennweite)	80	80	8
Fehler bei Referenzbedingungen	±1% v. M, + 0,5% v. E.	±1% v. M. + 0,5% v. E.	±0,2% v. M. + 0,1% v. E.
Temperaturgrenzen (PTFE-Auskleidung)	180 °C	90 °C	180 °C
Rohrverschmutzung	Nullpunktdrift	kein Einfluß	Signalausfall bei Elektrodenisolierung

[1]) bei mittleren Strömungsgeschwindigkeiten $v_m = 0{,}25$ ... 10 m/s

Aufgrund dieser Vorteile haben pulsierende Gleichfeld-Meßsysteme die 50-Hz-Wechselfeldsysteme mehr und mehr verdrängt. Der Leistungsbedarf läßt sich noch weiter senken, so daß in Zukunft mit batteriegespeisten induktiven Durchflußmessern dieser Art zu rechnen ist.

Nachteilig wirken sich starke Rohrverschmutzungen auf eintauchende Elektroden aus. Entstehen isolierende Überzüge (isolierende Fett-, Metalloxid- oder Mineralschichten), so fällt das Meßsignal aus. Das Elektrodensystem muß gereinigt werden. Diesen Nachteil vermeidet ein Wechselfeldsystem mit kapazitivem Abgriff. Die Elektroden sind hier elektrisch isoliert angebracht, so daß dünne dielektrische Ablagerungen keinen Einfluß haben. Bei dicken Schichten wird allerdings der kapazitive Widerstand so groß, daß auch hier Ausfälle entstehen können und eine Reinigung des Meßwandlers erforderlich wird.

1.3. Beispiel

Ein Beispiel für ein modernes induktives Meßsystem mit pulsierendem Gleichfeld zeigt Bild 3. Es ist das Blockschaltbild eines Rohreinbau-Meßwandlers mit PTEE- oder Al_2O_3-Wandauskleidung, der in einer kompakten Einheit den Meßgeber, die elektronische Meßwertverarbeitung und die Meßregimesteuerung enthält (Typ DISCOMAG von FLOWTEC AG/Schweiz) [4]. Die Steuerung übernimmt ein Mikroprozessor. Über ihn wird das Magnetfeld geschaltet und das Meßsignal getaktet. Ein vom Spulenstrom abgeleitetes Referenzsignal kompensiert Schwankungen des Spulenstromes. Die Schaltfolge des Magnetfeldes und die daraus resultierende Meßimpulsfolge sind aus der Netzfrequenz abgeleitet. Wesentliches Element ist die Autozero-Schaltung (AZ). Hier erfolgt automatisch die Kompensation von elektrochemischen und Netz-Störspannungen.

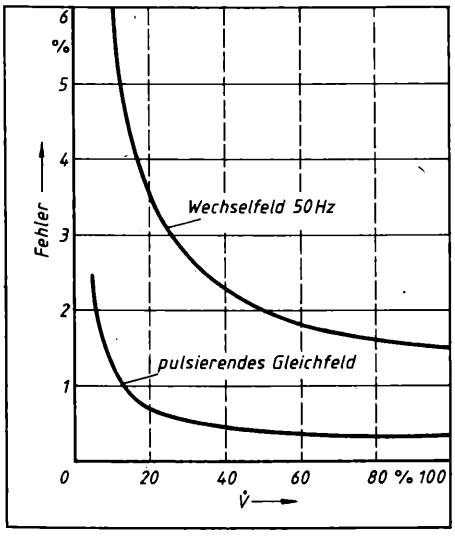


Bild 2. Meßfehlergrenzenvergleich 50 Hz Wechselfeld — pulsierendes Gleichfeld

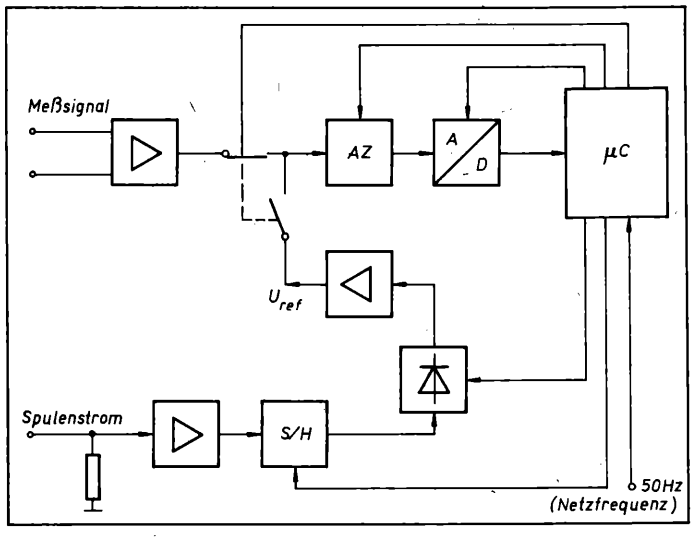


Bild 3. Blockschaltbild eines induktiven Durchflußmessers mit pulsierendem Gleichfeld, gesteuert von einem Mikroprozessor [3]

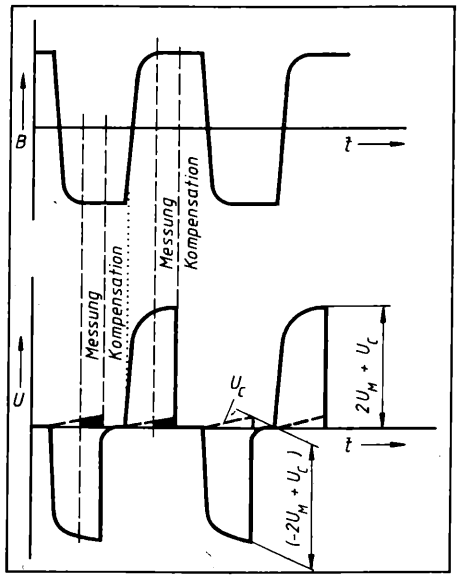


Bild 4. Prinzip der Signalgewinnung bei pulsierendem Gleichfeld *B*
U_M Meßsignal; U_c elektrochemische Störspannung; Magnetfeld-Pulsfrequenz ist z. B. 12,5 Hz oder 10 Hz

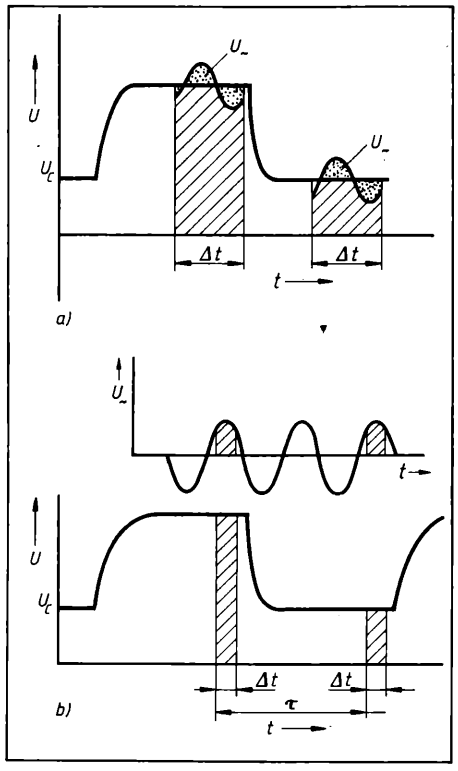


Bild 5. Unterdrückung netzfrequenter Störspannungen
a) Abtastzeit $t_A = \Delta t$ ist der Netzperiodendauer gleich; b) Abtastperiodendauer τ ist ein ganzzahliges Vielfaches der Netzperiodendauer

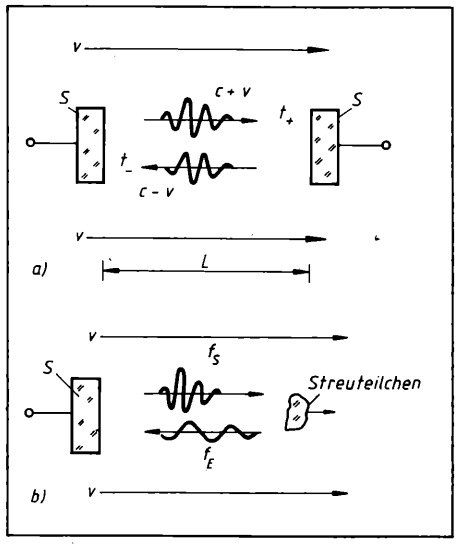


Bild 6. Akustische Strömungsgeschwindigkeitsmessung nach dem Schall-Mitführeffekt und nach dem Doppler-Effekt
a) Mitführprinzip; b) Dopplereffekt
S Ultraschall-Schwinger

Bild 4 zeigt ein Prinzip der Signalgewinnung. Nachdem das Magnetfeld seinen konstanten Wert erreicht und sich das Meßsignal gebildet hat, wird der Meßwert gespeichert und anschließend das Potential auf Null gesetzt (Kompensation). Die elektrochemische Störspannung ist gestrichelt gezeichnet und als linear ansteigend angenommen (U_c).

Bei Umschalten des Magnetfeldes wiederholt sich der Vorgang mit umgekehrtem Vorzeichen der Meßspannung U_M. Der entstehende Meßwert ist stets die Summe der Spannungen aus zwei aufeinanderfolgenden Halbphasen ($2U_M + U_c$). Von zwei aufeinanderfolgenden Speicherwerten wird die Differenz gebildet

$$(2U_M + U_c) - (-2U_M + U_c) = 4U_M , \tag{6}$$

so daß die elektrochemische Störspannung kompensiert wird und das Ausgangssignal die Summe von vier aufeinander folgenden Einzelmeßwerten ist.

Netzfrequente Störspannungen eliminiert man durch Bildung des Mittelwertes der Meßspannung über eine Tastzeit t_A, die der Netzperiodendauer gleich ist. Bei 50 Hz ist $t_A = 20$ ms (Bild 5). Das ist auch möglich, wenn die Periodendauer der Meßwertabtastung τ, ein ganzzahliges Vielfaches der Netzperiodendauer T_N

$$\tau = n \cdot T_N , \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \tag{7}$$

ist. Im Bild 5b ist $n = 2$. Die Beiträge der Netzstörspannung heben sich durch die Differenzbildung auf.

Nach neueren Entwicklungen sind auch Wechselfeldsysteme in der Lage, netzfrequente Störspannungen beliebiger Phasenlage gut zu unterdrücken. Dazu wird das Magnetfeld des Meßwandlers mit der halben Netzfrequenz gespeist (abgeleitet aus der Netzfrequenz). Kernstück ist der phasenempfindliche Gleichrichter, der den Spannungsmittelwert über die halbe Periodendauer des Meßsignals und damit über die ganze Periodendauer der Netzstörspannung bildet ($\bar{U}_\sim = 0$) [5].

Als Vorteile und Einsatzgrenzen des induktiven Durchflußmessers lassen sich anführen:

Vorteile	Einsatzgrenzen
— Messung unabhängig von Temperatur, Druck und Viskosität	— nur auf leitende Flüssigkeiten anwendbar, $\varkappa \geqq 1$ µS/cm
— keine mechanisch bewegten Teile	— Ablagerungen im Meßrohr führen zu Meßfehlern
— kein Druckverlust	— Leistungsbedarf relativ hoch (für autonom arbeitende Geräte noch nicht geeignet)
— gute Linearität	
— hohe Meßsicherheit	
— weitgehende Strömungsprofilunabhängigkeit	

2. Akustische Geschwindigkeits- und Durchflußmeßtechnik

2.1. Akustische Strömungsmeßverfahren

Akustische Strömungsmeßverfahren benutzen Schallwellen zur Bestimmung der Geschwindigkeit und des Durchflusses. Meßgrößen für die Bewegung sind Frequenzänderungen, Laufzeitdifferenzen, Phasenverschiebungen oder Wegverdriftungen der Schallwellen. Gemeinsames Merkmal ist, daß sich die Auflösung mit der Schallfrequenz erhöht. Deshalb arbeiten alle Strömungsmesser mit Ultraschall.

Zwei Prinzipien finden Anwendung (Bild 6):

— der Mitführeffekt
— der Doppler-Effekt.

Beim Mitführeffekt werden Laufzeitunterschiede von Schallwellen gemessen

$$\left.\begin{aligned} t_+ &= L/(c + v) \quad \text{in Strömungsrichtung} \\ t_- &= L/(c - v) \quad \text{gegen Strömungsrichtung} . \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

c Schallgeschwindigkeit; v Strömungsgeschwindigkeit; L Streckenlänge

Die Strömungsgeschwindigkeit ist eine lineare Funktion der Laufzeitdifferenz

$$v = \frac{c^2}{2L}(t_- - t_+) . \tag{9}$$

Um die Schallgeschwindigkeit zu eliminieren, werden das Produkt oder die Summe der Laufzeiten gebildet

$$v = \frac{L(t_- - t_+)}{2 \cdot t_- \cdot t_+} \tag{10}$$

$$v = \frac{2L(t_- - t_+)}{(t_- + t_+)^2} . \tag{11}$$

Der Rechner bestimmt die Größen $(t_- - t_+)/(t_- \cdot t_+)$ oder $(t_- - t_+)/(t_- + t_+)^2$. Zur Unterdrückung von Störungen werden Zeitfenster und Schwellenwertdetektoren für die Empfangssignale benutzt. Da die Zeitdifferenz sehr klein ist, z. B. 0,5 ns in einer 10 cm langen Meßstrecke bei 1 cm/s Strömungsgeschwindigkeit, vergrößert man die Differenz durch Vervielfachung eines Impulsumlaufes. Jeder Empfangsimpuls löst am Empfänger einen neuen Sendeimpuls aus, so daß eine Impulsumlauffrequenz entsteht (Sing-around-Frequenz), in Strömungsrichtung f_+ und gegen die Strömungsrichtung f_-. Die Differenz ist von der Schallgeschwindigkeit unabhängig. Damit erhält man

$$v = \frac{L}{2}(f_+ - f_-) . \tag{12}$$

Dieser Vorteil wird allerdings durch eine große Meßzeit erkauft. Neuere Arbeiten reduzieren die Zahl der Umläufe drastisch und messen die Laufzeiten in einer Kombination von diskreten und analogen Schritten, so daß die Meßzeit auf wenige ms reduziert werden kann [6].

Strömungsgeschwindigkeitsmessungen nach dem **Doppler-Effekt** sind möglich, wenn die Strömung schallstreuende Teilchen mit sich führt. Sie wirken als bewegte Empfänger und Sender. Ihre geometrischen Abmessungen sollen größer als ein Zehntel der Wellenlänge sein, andererseits so klein bleiben, daß sie der Strömung schlupflos folgen.

Bild 7 zeigt die Anwendung beider Meßprinzipien zur Durchflußmessung in Rohren. Die Schwinger sind entweder in das Rohr eingelassen und stehen mit dem Fluid in Kontakt (Einbausysteme), oder sie werden außen angeklemmt und durchstrahlen zweimal die Rohrwand (Anklemm- oder Clamp-on-Systeme).

Die Durchflußmessung unterscheidet sich von der des magnetisch induktiven Verfahrens in der Bildung des Mittelwertes der Geschwindigkeit. Beim Laufzeitdifferenzverfahren wird nach Bild 7 eine über den Schallweg gemittelte Strömungsgeschwindigkeit gemessen

$$v'_m = \frac{1}{2L}\int v(r) \cdot \sin\beta \cdot \mathrm{d}s . \tag{13}$$

Sie stimmt nicht mit der über den Querschnitt gemittelten Geschwindigkeit v_m überein

$$v_m = \frac{1}{\pi \cdot R^2}\int v(r) \cdot 2\pi \cdot r \cdot \mathrm{d}r . \tag{14}$$

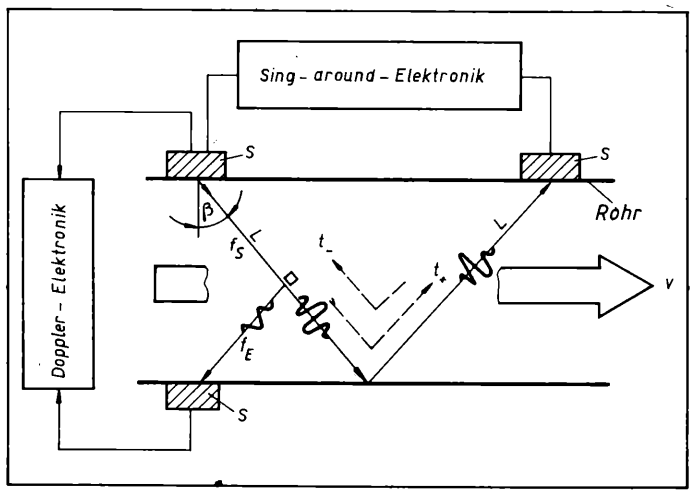


Bild 7. Akustische Durchflußmessung
— nach dem Mitführeffekt mit Sing-around-Elektronik (Reflexion an der Rohrwand)
— nach dem Doppler-Effekt mit Doppler-Signalprozessor
S Ultraschall-Schwinger; f_S, f_E Sende- und Empfangsfrequenz

So entsteht ein Kalibrierungsfaktor

$$k = v_m/v'_m , \tag{15}$$

der von der Reynolds-Zahl und der Rauheit des Rohres abhängt [7]. Die Abhängigkeiten zeigt im Bild 8 die obere Kurvenschar für glatte Rohre und Rohre mit der relativen Rauheit $k'/D = 0{,}01$ und $k'/D = 0{,}1$ (D Rohrdurchmesser). Die Reynolds-Zahl-Abhängigkeit kann im Rechner berücksichtigt werden. Ändert sich die relative Rauheit infolge von Korrosion oder Ablagerung während des Betriebes, so entstehen Fehler, die mit Hilfe der hier berechneten Funktionen abgeschätzt werden können. Kritisch ist der Bereich des Überganges von der laminaren zur turbulenten Strömung (bei $Re = 2300$). Er sollte bei akustischer Durchflußmessung gemieden werden, denn hier springt der Kalibrierungsfaktor von 0,75 auf etwa 0,9.

Noch größer ist der Sprung, wenn der Volumenstrom durch Messung der Maximalgeschwindigkeit v_{max} (z. B. Doppler-Messungen in einem kleinen Meßvolumen in der Rohrachse) ermittelt wird. Der Kalibrierungsfaktor (untere Kurvenschar) springt von 0,5 auf etwa 0,75. Auch seine Abhängigkeit von der Rauheit des Rohres ist größer als bei der Messung über einen Pfad quer durch das Rohr.

Bild 8. Kalibrierungsfaktoren bei akustischer Durchflußmessung in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl und der relativen Rauheit des Rohres
v'_m mittlere Geschwindigkeit über den Meßpfad durch die Rohrachse; v_m über den Querschnitt gemittelte Geschwindigkeit; v_{max} Geschwindigkeit in der Rohrachse; k' Oberflächenrauheit; D Rohrdurchmesser; λ Rohrreibungszahl

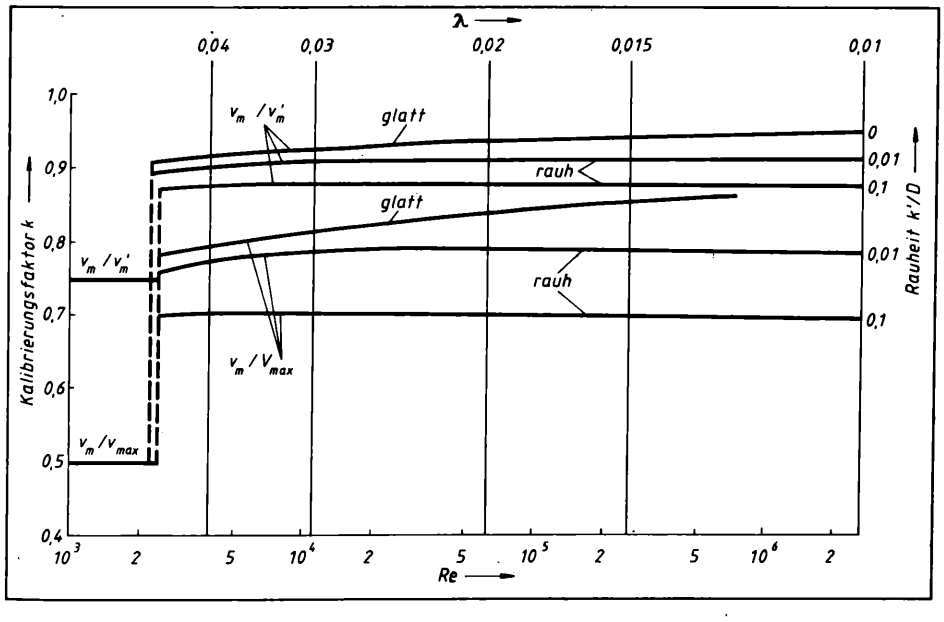
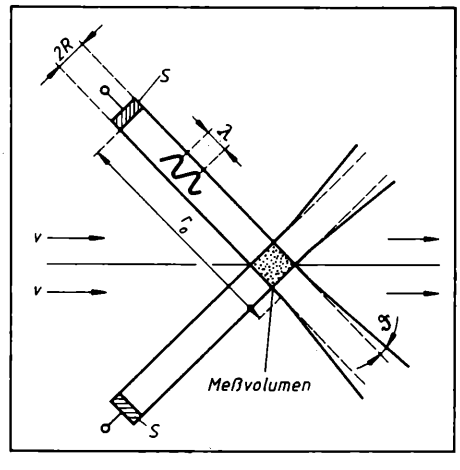


Bild 9. Meßvolumen beim akustischen Doppler-Meßverfahren
S Ultraschall-Schwinger; λ Wellenlänge der Schallwelle



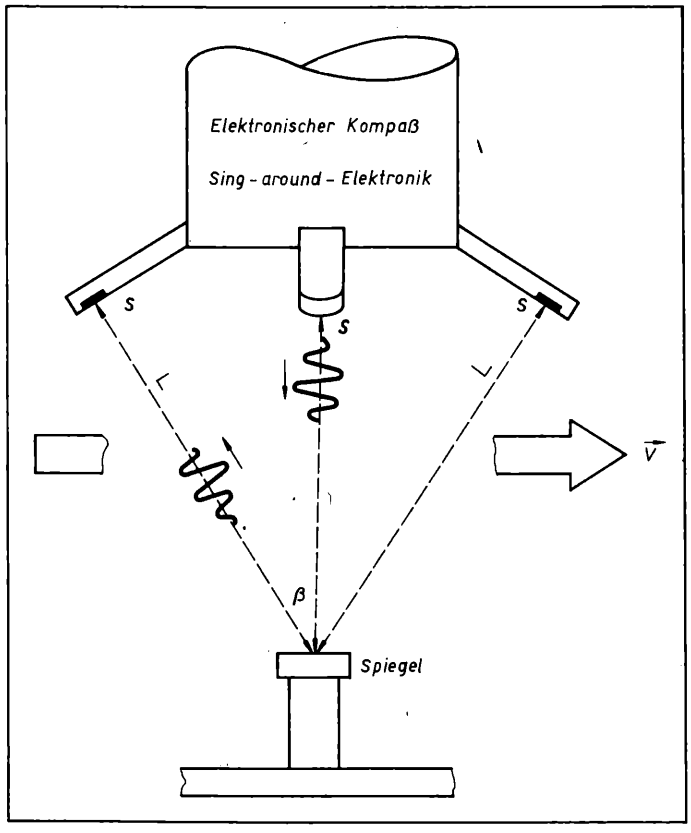


Bild 10. Ausschnitt aus einer Tauchsonde mit zwei akustischen Meßstrecken
2-Komponenten-Meßsonde für offene Gewässer; *S* Ultraschall-Schwinger

Die Geschwindigkeitsmessung nach dem Doppler-Verfahren erfolgt in einem Meßvolumen, das im Überlappungsbereich der Schallstrahlen liegt (Bild 9). Die Größe läßt sich für das Nah- und Fernfeld berechnen, wenn die Schwingerabmessungen, die Sendefrequenz und die Schallgeschwindigkeit im Meßstoff bekannt sind:

— Nahfeldausdehnung: $r_0 = R^2/\lambda$
— Öffnungswinkel des Strahles im Fernfeld: $\sin \vartheta_0 = 0{,}61\lambda/R$.

So errechnet sich z. B. für eine 90°-Schwingeranordnung mit Sendeschwinger $f_s = 5$ MHz, $R = 6$ mm, Wellenlänge im Wasser $\lambda = 0{,}3$ mm, $r_0 = 120$ mm, $\vartheta_0 = 1{,}7°$, das Meßvolumen $V \approx 1$ cm³. Mit Fokusschwingern oder Vorschalten akustischer Linsen lassen sich Meßvolumina < 1 mm³ erzeugen.

Sind die Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des Meßvolumens örtlich verschieden, so entsteht am Ausgang des Detektors ein Spektrum von Doppler-Frequenzen mit einer mittleren Doppler-Frequenz Δf. Die Bandbreite $\Delta(\Delta f)$ ist ein Maß für die Geschwindigkeitsunschärfe im Meßvolumen. Gegenwärtige Untersuchungen sind darauf gerichtet, günstige Schwingeranordnungen zu schaffen, die Doppler-Spektren liefern, aus denen schnell und zuverlässig eine Frequenz gewonnen werden kann, die dem Mittelwert der Geschwindigkeit über den gesamten Rohrquerschnitt entspricht [8].

Wichtige Meßsysteme sind **Geschwindigkeitsmeßstrecken mit eintauchenden Sonden.** Bild 10 zeigt den Ausschnitt einer Tauchsonde für eine vektorielle Geschwindigkeitsmessung in strömenden Flüssigkeiten. Zwei Schwingerpaare spannen ein orthogonales Meßsystem auf. Der Meßraum befindet sich zwischen den Schwingerarmen und dem reflektierenden Spiegel. Ein im Tauchkörper installiertes magnetisches Orientierungssystem aus Foerster-Sonden ermöglicht die Richtungserkennung im Magnetfeld der Erde. Ein derartiges Meßsystem wurde für das Institut für Meereskunde Warnemünde entwickelt und ist dort im Einsatz [9].

Strömungsmesser, elektronischer Kompaß, Verrechnung der Komponenten und Frequenzwandlung zur Kabelübertragung bilden eine Einheit, die leistungsminimiert arbeitet (0,8 Watt Gesamtleistung).

Einige technische Daten von akustischen Strömungsgeschwindigkeitsmessern sind in Tafel 3 enthalten. Eine weitere Verkürzung der Meßzeiten ist möglich, wodurch man den akustischen Strömungsmesser auch für Turbulenzuntersuchungen einsetzen kann. Bild 11 zeigt den Computerausdruck einer Turbulenzmessung in einem Versuchsbassin mit der Meßsonde von Sensordata a—s [10].

2.2. Windgeschwindigkeitsmesser

Akustische Windgeschwindigkeitsmesser werden vorzugsweise in der Meteorologie zur Untersuchung atmosphärischer Turbulenzen eingesetzt. Gegenüber Meßstrecken in Wasser ist zu beachten:

— aus Dämpfungsgründen ist die Arbeitsfrequenz wesentlich niedriger: $f = 100$ kHz
— die Schallgeschwindigkeit beträgt nur ein Fünftel der des Wassers
— der Öffnungswinkel des Schallstrahles ist wesentlich größer, $\vartheta_0 = 30°$ bei $D = 8$ mm
— die Geradeausstrecke wird bevorzugt.

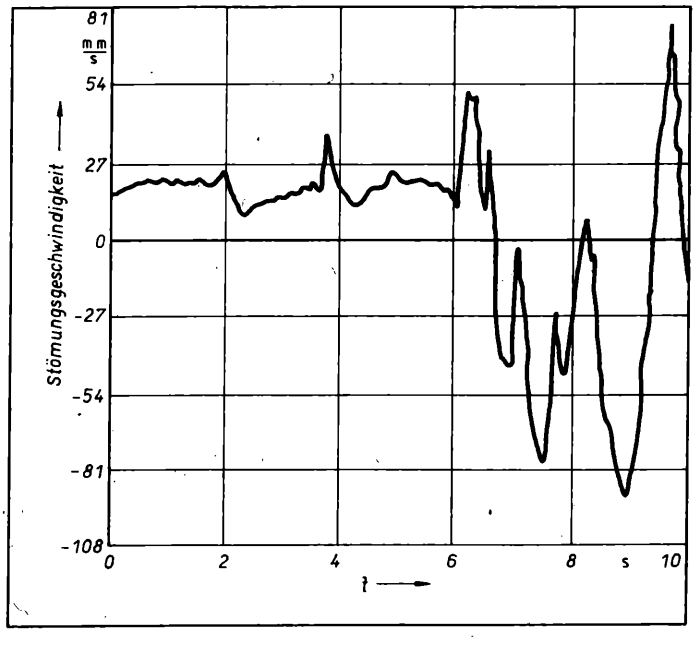


Bild 11. Turbulenz einer Strömungskomponente in einem Versuchsbassin nach [10]

Tafel 3. Akustische Strömungsgeschwindigkeitsmesser mit tauchenden Sonden
$\Delta\varphi$ Phasendifferenz; Δt Laufzeitdifferenz

Typ Hersteller	SM 22 ME (BRD)	DRCM-2 Neil Brown (USA)	UCM-10 Simrad (N)	SD 12 Sensordata (N)	AS-2 TE/IfM DDR
Komponenten	v_x, v_y, v_N, v_0	v_x, v_y	v_x, v_y, v_z	v_x, v_y, v_z	v_x, v_y, v_N, v_0
Meßprinzip	$\Delta\varphi$	Δt	Δt	Δt	Δt
Meßbereich	0 ... ±2; 0 ... ±5 m/s	0 ... 2,5 m/s	0 ... ±2; 0 ... ± 5 m/s	0 ... ±1; 0 ... ±10 m/s	0 ... ±2 m/s
Genauigkeit	±0,5 cm/s	±1 cm/s	±2% v. E.		±1 cm/s
Meßzeit	100 ms	200 ms	50 ms	33 ms	20 ms
Richtung	0 ... 360°	0 ... 360°	0 ... 360°		0 ... 360°
Genauigkeit	±1°	±2°	±5°		±3°
Leistung		0,12 W	3,2 W		0,8 W

Eine bemerkenswerte Kombination von Geschwindigkeits- und Temperaturmessung bietet das Sonic Anemometer-Thermometer der japanischen Firma *Kaijo Denki LTD* [11]. Es arbeitet nach dem Laufzeitverfahren und ermittelt die Strömungsgeschwindigkeit aus der Differenz und die Temperatur aus der Summe der reziproken Laufzeiten (Bild 12). Wesentliches Element ist ein schneller Dividierer, der nach jeder Zeitmessung vom Hin- und Rücklauf des Schallimpulses sofort den Reziprokwert bildet.

Die Verrechnung liefert

$$v = \frac{L}{2}\,\frac{t_- - t_+}{t_- \cdot t_+} \tag{16}$$

$$c = \frac{L}{2}\,\frac{t_- + t_+}{t_- \cdot t_+}\,. \tag{17}$$

Die Schallgeschwindigkeit ist von der absoluten Temperatur T, vom atmosphärischem Druck p und vom Wasserdampfdruck p_w abhängig

$$c = 20{,}067[T(1 + 0{,}3192p_w/p)]^{1/2}\,. \tag{18}$$

Damit ergeben sich

$$T = K\left(\frac{t_- + t_+}{t_- \cdot t_+}\right)^2 \tag{19}$$

$$K = L^2/[1610{,}7 \cdot (1 + 0{,}3192p_w/p)]\,. \tag{20}$$

Das Anemometer mißt drei Geschwindigkeitskomponenten in einer Meßzeit von insgesamt 50 ms. Es ist somit in der Lage, Fluktuationen des Geschwindigkeitsvektors bis zu 20 Hz aufzulösen.

Meßbereich:	0 ... 30 m/s
Genauigkeit:	±1%
Meßstrecken:	je 200 mm Länge
Temperatur:	−10 ... +40 °C
Temperaturfluktuation:	bis 10 Hz.

2.3. Akustische Durchflußmesser

Akustische Durchflußmesser sind für Rohre mit Nennweiten von 8 mm bis zu einigen Metern entwickelt worden. Vorwiegend werden Volumenströme niederviskoser Flüssigkeiten gemessen ($\nu < 100$ cSt).

Üblich ist die Einbauvariante, bei der der Meßpfad schräg durch die Mitte des Rohres führt; die Schwinger stehen mit dem Fluid in Berührung.

Die charakteristischen Daten dieser Anordnung sind:

Meßbereichsendwerte:	1 m/s bis 10 m/s
Meßfehler:	±1% v. E.
Meßstofftemperaturen:	−10 °C bis +100 °C
Schwinger:	1 MHz bis 5 MHz
Mindestzulaufstrecken:	10 × Rohrdurchmesser
Mindestablaufstrecken:	3 × Rohrdurchmesser.

Bis DN 500 werden komplette Rohreinsätze gefertigt. Bei größeren Rohren erfolgt ein spezieller Einbau der Schwingerköpfe in das Rohr.

2.4. Mehrkanalige akustische Durchflußmesser

Mehrere akustische Meßstrecken arbeiten nebeneinander außerhalb der Rohrmitte. Sie messen jeweils eine geringere mittlere Geschwindigkeit als bei zentraler Durchstrahlung. Damit erhöhen sich die Kalibrierungsfaktoren. Da mit der Verschiebung der Meßstrecke aus der Rohrmitte zum Rand der Kalibrierungsfaktor für die laminare Strömung schneller wächst als der für die turbulente, gibt es einen Abstand zur Achse, bei dem beide Faktoren nahezu gleich groß sind. Das ist der Grundgedanke für die Verschiebung der Meßstrecke auf diesen Abstand, denn hier erhält man nahezu unabhängig vom Strömungszustand mit dem gleichen Kalibrierungsfaktor die über den Querschnitt gemittelte Strömungsgeschwindigkeit. Die zweite symmetrisch zur Rohrachse eingesetzte Meßstrecke korrigiert Unsymmetrien im Strömungsprofil (z. B. Querströmungen). So verringert sich z. B. der Meßfehler auf ±0,4% v. M. + 0,5% v. E.

Der Reynolds-Zahl-Einfluß bleibt über einen Bereich von $1000 \leqq Re \leqq 10^6$ kleiner als 0,3%.

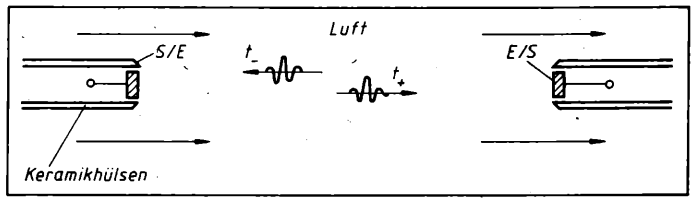


Bild 12. Akustisches Windanemometer-Thermometer (Laufzeitverfahren) nach [11]
S/E Sende-/Empfangsschwinger; *E/S* Empfangs-/Sendeschwinger

Ein Durchflußmesser mit vier akustischen Meßstrecken nebeneinander erzielt eine noch bessere Mittelung. Der Meßfehler verringert sich um etwa zwei Zehntel Prozent. Die Verbesserungen werden mit höherem gerätetechnischem Aufwand erkauft. Ein Vierkanal-Durchflußmesser wurde zur Messung des Leistungsumsatzes einer Turbine in einem Wasserkraftwerk eingesetzt, und zwar im Einlaufrohr der Turbine mit einer Nennweite von 6 m. Er garantierte eine Genauigkeit des Volumenstromes von ±0,3% und eine Reproduzierbarkeit von kleiner als ±0,5% [12].

2.5. U-Rohr-Durchflußmesser

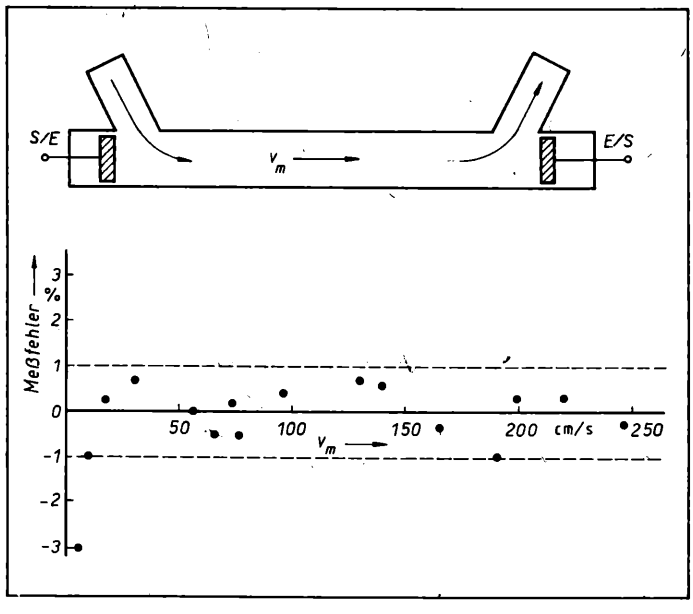
Zur Volumenstrommessung in Rohrleitungen mit kleinen Nennweiten werden U-Rohre mit geraden Ultraschall-Meßstrecken verwendet. Bild 13 zeigt einen Durchflußmesser mit Schlauchanschluß. Die wirksame Meßstreckenlänge L ist aus der Geometrie der Anordnung nicht genau bestimmbar. Die starken Verformungen des Strömungsprofils im Einlauf- und Auslaufbereich machen eine gerätespezifische Kalibrierung erforderlich. Diese liefert die effektiv wirksame Streckenlänge. Eine Fehlermessung ergab, daß im Bereich von 10 cm/s bis 2,40 m/s die Abweichungen kleiner als ±1% bleiben [13].

2.6. Meßstrecken mit angeklemmten Meßköpfen (Clamp-on-Systeme)

Sie haben den großen Vorteil, daß kein mechanischer Eingriff in die Rohrleitung erforderlich ist. Meßköpfe sind für Laufzeit- und für Doppler-Verfahren entwickelt worden. Sie werden über ein Koppelgel an die Rohrwand geklemmt. Der Schallstrahl durchquert die Rohrwand, das Fluid und nochmals die Rohrwand. An den Grenzflächen erfolgt eine Brechung, so daß der Einstrahlwinkel in das Fluid begrenzt ist.

Grenzbedingungen sind im Bild 14 angegeben. Hier wird vorausgesetzt, daß der Schwinger in Harz eingebettet ist, die Rohrwand

Bild 13. U-Rohr Durchflußmesser für kleine Rohr-Nennweiten (Laufzeitmethode)
S/E Sende-/Empfangsschwinger; *E/S* Empfangs-/Sendeschwinger; v_m über den Querschnitt gemittelte Strömungsgeschwindigkeit



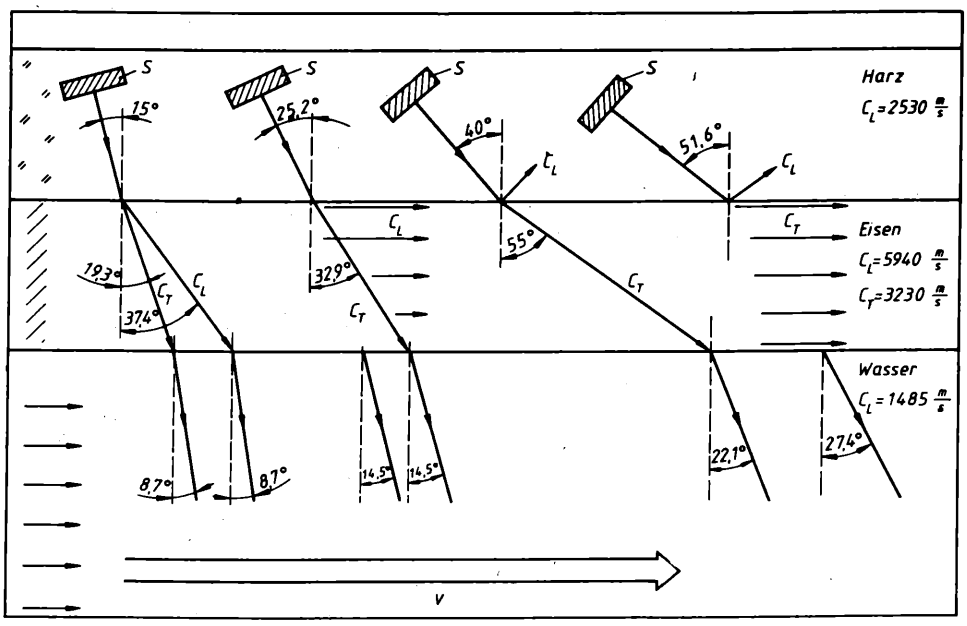


Bild 14. Schallstrahlbrechung bei Übergängen von Epoxydharz — Eisen — Wasser bei unterschiedlichen Einstrahlwinkeln
S US-Schwinger in Harz eingebettet; C_L, C_T Schallgeschwindigkeit von Longitudinal- und Transversalwelle

aus Eisen besteht und das Fluid Wasser ist. Damit sind zwei Grenzflächen für die Einstrahlung gegeben: Harz — Eisen und Eisen — Wasser.

Nach dem Brechungsgesetz von SNELLIUS lassen sich folgende Strahlengänge berechnen. Im Eisen erfolgt eine Aufspaltung in Longitudinal- und Transversalwelle mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten c_L und c_T:

1. Bei kleinen Einstrahlwinkeln (im Beispiel 15°) laufen beide Anteile durch die Rohrwand in das Fluid.
2. Beim Grenzwinkel für die Longitudinalwelle 25,2° breitet sich diese längs der Rohrwand aus und tritt in einem verbreiterten Strahl in das Fluid.
3. Bei größeren Winkeln wird die Longitudinalwelle reflektiert, nur die Transversalwelle geht durch.
4. Der Grenzwinkel ist für die Transversalwelle erreicht (51,6°). Sie breitet sich längs der Rohrwand aus und tritt in einem breiten Strahl in das Fluid.

Damit ergibt sich für die skizzierte Kombination ein Einstrahlgrenzwinkel von 27,4°.

Clamp-on-Systeme haben geringere Genauigkeiten als Einbausysteme:

Clamp-on-Laufzeitstrecken:
Clamp-on-Doppler-Strecken: ±2% bis ±5% v. E.

Als Vorteile und Nachteile findet man:

Vorteile	Nachteile
— berührungsfreie Messung	— Abhängigkeit vom Strömungsprofil (größere Einlaufstrecken erforderlich)
— keine Druckverluste	— Ablagerungen im Rohr führen zu Meßfehlern
— großer Nennweitenbereich	— Unterbrechung bei Gaspolster vor Schwinger.
— kleiner Leistungsbedarf	
— mobile Meßtechnik (Clamp-on-Variante)	
— kleine Meßzeiten (10 ms)	
— unabhängig von physikalischen Eigenschaften bei homogenen Medien.	

3. Thermische Strömungsgeschwindigkeits- und Durchflußmeßtechnik

Thermische Strömungsmesser nutzen den Wärmetransport in einer Strömung zur Geschwindigkeitsmessung. Seit vielen Jahren ist die Hitzdraht- und Heißfilm-Anemometrie bekannt, sie ist besonders geeignet zur Messung dynamischer Vorgänge und wird in der Turbulenzforschung angewendet [14]. Mit der Entwicklung der hochauflösenden Laser-Doppler-Anemometrie, die berührungsfrei arbeitet und keine Kalibrierung braucht, entstand ein Meßverfahren, das die dominierende Stellung der thermischen Anemometrie einschränkte. Jedoch hat sie ihren Platz in der Strömungsmeßtechnik behauptet, indem neue Sondentypen entwickelt wurden und neue Verfahren zur thermischen Massestrommessung zur Anwendung kamen.

3.1. Meßprinzip

Der Wärmetransport von einer elektrisch erwärmten Sonde (Zylinder) in das umgebende Medium ist ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit (Bild 15). Die abgeführte elektrische Leistung von einem geheizten Zylinder mit der Länge L und dem Durchmesser D berechnet sich nach

$$I^2 \cdot R_s = L \cdot (T_S - T_F)\,[\lambda_F + (2 \cdot \pi \cdot D \cdot \lambda_F \cdot c_p \cdot \varrho_F \cdot v)^{0,5}] \quad (21)$$

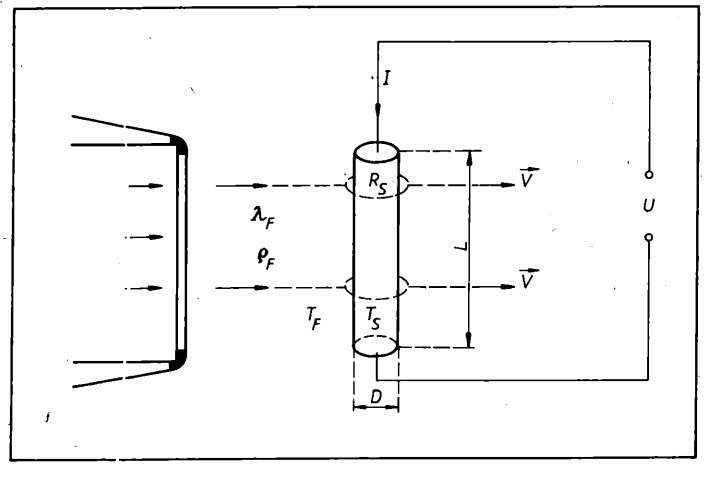
(Kingsche Beziehung).

I; R_S Strom, Widerstand der Sonde; T_S, T_F Temperatur der Sonde und des Fluids; λ_F Wärmeleitfähigkeit; c_p spezifische Wärme bei konstantem Druck; ϱ_F Dichte des Fluids; v Strömungsgeschwindigkeit

In einer Meßbrückenschaltung wird die von der Sonde abgegebene Leistung $I^2 \cdot R_S$ gemessen. Hauptsächlich wird die CTA-Schaltung (Konstant-Temperatur-Anemometer) benutzt. Darin werden die Temperatur der Sonde und damit deren Widerstand konstant gehalten und der Sondenstrom oder die Sondenspannung gemessen. Aus der Kingschen Beziehung resultiert

$$U^2 = A + B \cdot v^{0,5}\,. \quad (22)$$

Bild 15. Hitzdraht-/Heißfilm-Anemometer (Meßprinzip)
links: Sonde mit Haltespitzen; rechts: Wärmeableitung vom geheizten Zylinder



Tafel 4. Hitzdraht-/Heißfilmanemometer
Beispiele für Luft- und Wassersonden (nach [16]); T_F, T_S Fluid-, Sondentemperatur; f_g Grenzfrequenz des Sensors

Sensor	D µm	L mm	v_{min} m/s	v_{max} m/s	$T_{F_{max}}$ °C	$T_{S_{max}}$ °C	f_g(CTA) kHz	Fluid
W-Draht + Pt-Film	4	1,25	0,15	200	150	300	600	Luft
Pt-Draht	5	1,25	0,15	100	750	800	500	Luft
Pt-Film auf	25	0,25	0,15	350	150	425	200	Luft
Quarzfaser			0,3	10		80		Wasser
Splitfaser	152	2,0	0,15	350	150	425	20	Luft
Pt-Filme			0,3	1,5		80		Wasser
Metall-	400	2,5	0,15	66	100	125	0,01	Luft
Mantel			0,3	1,5		80		Wasser

Genauere analytische Betrachtungen weisen diese Beziehung als Näherung aus, sie gilt (mit A und B als Konstanten und dem Exponenten 0,5) nur für begrenzte Geschwindigkeitsbereiche.

3.2. Meßsonden

Industriell wird eine Vielzahl von Draht-, Film-, Metallmantel- und Perlensonden angeboten [15] und [16]. Einige Beispiele sind in Tafel 4 zusammengestellt, sie weisen die hohe Leistungsfähigkeit hinsichtlich Temperaturbereich und Schnelligkeit aus. Detaillierte Angaben über das zeitliche Verhalten von Sonden bei schnellen Zustandsänderungen sind bei HOFFMEISTER [17] zu finden.

Thermische Strömungsmeßsonden werden in Wind- und Wasserkanälen zur Registrierung des zeitlichen Verlaufs schneller instationärer Strömungsvorgänge eingesetzt. Sie können ebensogut als Temperatursensoren benutzt werden [18].

Luftgeschwindigkeitsmesser erfüllen in der Mehrzahl die Forderungen der Raumklimatechnik nach Auflösungen von 10 Hz Strömungsgeschwindigkeitsschwankungen. Besonderes Interesse gilt den Spitzenwerten, die ein Mehrfaches des Durchschnittwertes erreichen können und für die Störung der laminaren Grenzschicht am menschlichen Körper verantwortlich gemacht werden können. Die Störung bewirkt eine höhere Wärmeabgabe an die Luft und damit das Empfinden von Zugerscheinungen.

3.3. Thermische Durchflußmesser

Thermische Durchflußmesser sind Rohrstücke mit thermischen Meßelementen und elektronischen Anzeigegeräten. Sie werden industriell für Gase und Flüssigkeiten gefertigt und mit Standardsubstanzen kalibriert. Ihr besonderer Vorteil besteht in der Messung des Massestromes.

3.3.1. Abkühlmethode (Bild 16)

Der vom Heizelement abgeführte Wärmestrom $\dot{Q}$ ist dem Produkt $(\varrho_F \cdot v)^{0,5}$ proportional

$$\dot{Q} = (T_S - T_F)\,[A + B(\varrho_F \cdot v)^{0,5}]\,. \tag{23}$$

Das Meßsignal der Sonde wird vom Produkt $\varrho_F \cdot v$ gebildet. Die Sonde ist aber auf das Produkt $\varrho_0 \cdot v_0$ kalibriert (ϱ_0 Dichte des Fluids bei Bezugstemperatur T_0 und Bezugsdruck p_0). So gibt der Durchflußmesser stets die temperatur- und druckkorrigierte Geschwindigkeit v_0 an

$$v_0 = \varrho_F \cdot v/\varrho_0 \tag{24}$$

$$v_0 = v \cdot T_0 \cdot p/(T \cdot p_0)\,. \tag{25}$$

p, T Druck, Temperatur des Fluids im Meßzustand

Die automatische Temperatur- und Druckkorrektur gehört zu den Vorzügen thermischer Durchflußmesser. Durch Multiplikation mit der umströmten Fläche erhält man den Volumenstrom

$$\dot{V} = v_0 \cdot A \qquad \mathrm{m^3/s\ (normiert)} \tag{26}$$

und den Massestrom

$$\dot{m} = \varrho_0 \cdot v_0 \cdot A \qquad \mathrm{kg/s\ (normiert)} \tag{27}$$

stets bei der Normtemperatur und dem Normdruck. Für Gasmessungen sind solche Angaben besonders wünschenswert.

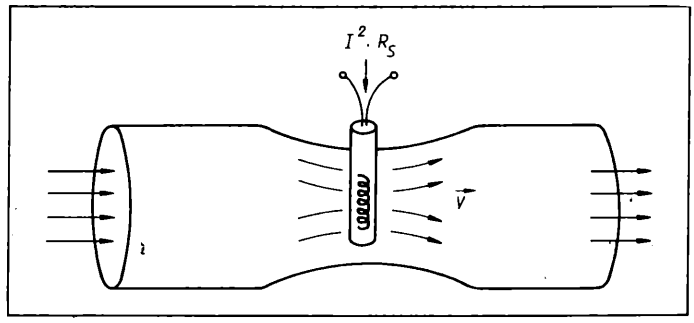


Bild 16. Thermischer Durchflußmesser mit Heizsonde im Fluid

Industriell gefertigte Durchflußmesser nach dem Abkühlverfahren haben eintauchende thermische Meßfühler, das sind metallmantelgeschützte Hitzdraht- oder Heißfilmsonden. Meist befinden sie sich in einer Rohreinschnürung, so daß ein Druckverlust in Kauf genommen werden muß. Es gelten folgende Angaben:

Meßbereichendwerte	0,05 bis 30000 (N) l/min
Meßfehler	$\pm 2\,\%$ v. M. + $0{,}5\,\%$ v. E.
Rohrdurchmesser	6 mm bis 200 mm.

3.3.2. Aufwärmmethode

Der zu messende Gas- oder Flüssigkeitsstrom wird von einem Heizer erwärmt. Die abgeführte Heizleistung ist

$$I^2 \cdot R = \dot{m} \cdot c_F \cdot \Delta T\,. \tag{28}$$

c_F spezifische Wärmekapazität des Fluids

Damit berechnet sich der Massestrom (Thomas-Meßprinzip) nach

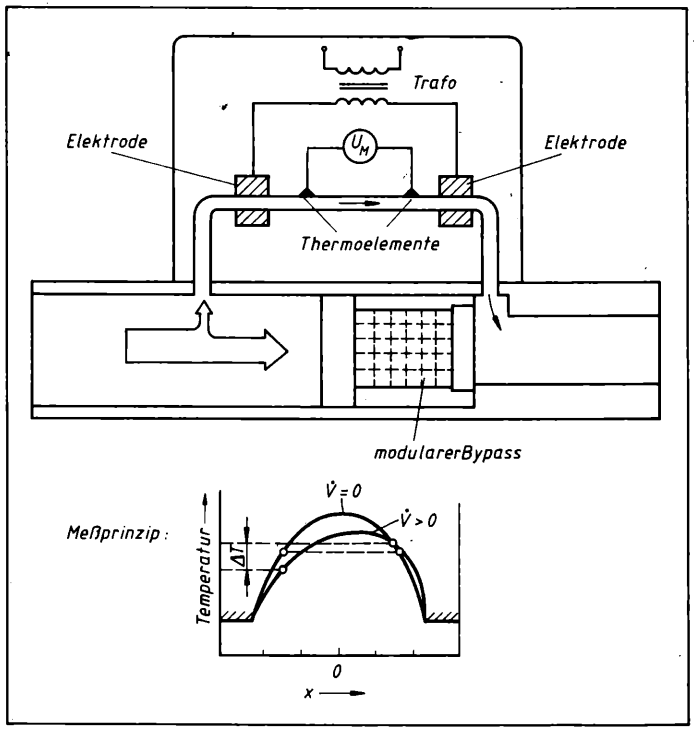
$$\dot{m} = I^2 \cdot R/(c_F \cdot \Delta T)\,. \tag{29}$$

In kombinierter Form wird die Aufwärmmethode und Abkühlmethode in Durchflußmessern mit Bypass angewendet (Hastings-Durchflußmesser) [19].

Bild 17 zeigt das Prinzip eines Gasdurchflußmessers mit einem Meßrohr parallel zum Hauptrohr.

Das Meßrohr ist dünnwandig und wird zwischen zwei Temperaturmeßstellen aufgeheizt. Ohne Strömung stellt sich längs der Rohr-

Bild 17. Gasdurchflußmesser mit Stromverzweigung (nach [19]), Meßrohr mit Bypass



wand eine parabolische Temperaturverteilung mit dem Höchstwert in der Mitte ein. Die Temperaturdifferenz zwischen den Meßstellen ist Null. Die Strömung verzerrt infolge des Wärmetransportes das Temperaturprofil und erzeugt eine dem Massestrom proportionale Temperaturdifferenz.

Das Bypass-Prinzip ermöglicht den Aufbau einer Serie von Meßköpfen für eine Vielzahl von Meßbereichen von 0 ... 5 (N) cm³/min bis 0 ... 15000 (N) l/min. Der im Meßkopf vorhandene Shunt ist auswechselbar, er dient der Anpassung des Meßbereiches an den zu erwartenden Massestrom.

Man kann folgende Bewertung thermischer Meßverfahren vornehmen:

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Hitzdraht- und Heißfilmsonden	— kleines Meßvolumen — sehr gutes dynamisches Verhalten — einfache Meßschaltungen	— nicht eingriffsfrei — Nachkalibrierungen erforderlich — Empfindlichkeit nimmt mit höherer Geschwindigkeit ab
Durchflußmesser	— Meßsignal ist dem Massestrom $\varrho \cdot v$ proportional — für kleine Rohrströmungen gut geeignet — eingriffsfreie Messung mit Rohrverzweigung (Bypass).	— Nachkalibrierungen erforderlich — Rohreinschnürungen oder Bypässe verursachen Druckverluste — Verschmutzung verändert Stromverteilung (Meßrohr-Bypass) und führt zu Meßfehlern.

4. Optische Strömungsmeßverfahren

Optische Meßverfahren dienen der Sichtbarmachung von Strömungsfeldern durch

- Markierung (Rauch, Schwimmkörper)
- Sichtbarmachung von Dichteunterschieden mit Hilfe von Schlierenverfahren, Interferenzverfahren, Holographie.

Optische Meßverfahren ermitteln die Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe von

- optoelektronischer Gitterabtastung
- Laser-Doppler-Anemometrie
- Laser-2-Fokus-Anemometrie.

Die Geschwindigkeitsverfahren gehören zu den modernen Meßverfahren der Hydro- und Aerodynamik. Sie arbeiten kalibrierungsfrei und zeichnen sich durch eine hohe Dynamik aus.

4.1. Optoelektronische Gitterabtastung

Eine Ebene des Fluids wird auf eine optische Strichgittermaske abgebildet. Hinter der Maske befindet sich der Fotoempfänger, der das Licht aus den Gitterspalten summiert und in ein elektrisches Signal $U(t)$ wandelt (Bild 18). Das Verfahren setzt voraus, daß im Fluid Streuteilchen vorhanden sind, die als bewegte Licht- oder Schattenpunkte der Strömung schlupflos folgen. Der Empfänger sieht ihre Bahnen nur strichweise und liefert entsprechend ihrer Folge ein Wechselsignal mit der Frequenz f. Hat die Gittermaske die Gitterkonstante g und ist der Abbildungsmaßstab β, so ergibt sich die Geschwindigkeit

$$v = g \cdot f/\beta \,. \tag{30}$$

Eine interessante Lösung für ein Gitter ist das Aneinanderreihen von Lichtleitfasern zu einer Zeile. Die Ausgänge münden gemeinsam auf einen Photoempfänger, so daß eine abbildende Optik entfallen kann [20]. Eine andere Lösung benutzt eine CCD-Zeile als Gitter [21]. Sie hat 256 oder 1024 Elemente und liegt parallel zur Strömungsrichtung. Bild 19 zeigt eine Zeile, die als Differenzgitter geschaltet ist. Die einzelnen Elemente der Zeile werden alternierend zusammengefaßt (Summierung der Ladungspakete in den jeweiligen Schieberegistern). Bild 19 zeigt außerdem eine Aperturfunktion $a(x, y)$, die zur Berechnung des Frequenzspektrums dient.

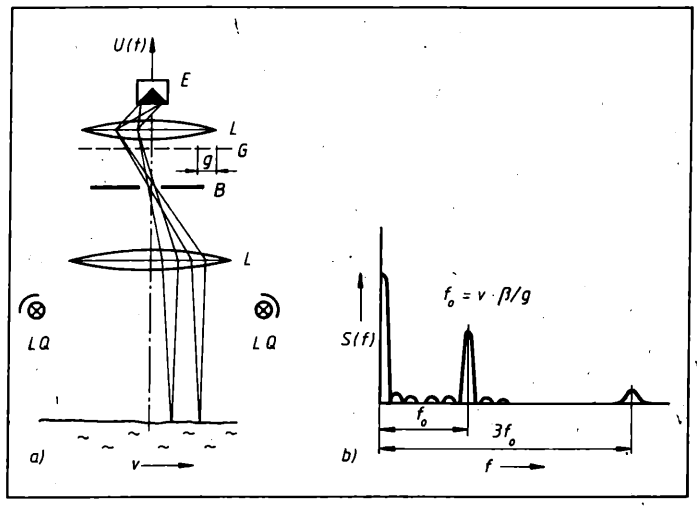


Bild 18. Geschwindigkeitsmessung nach dem Ortsfilterverfahren, optoelektronische Gitterabtastung
a) Gitterabtastung; b) Leistungsdichtespektrum
f_0 Signalfrequenz bei der Strömungsgeschwindigkeit v, dem Abbildungsmaßstab β und der Gitterkonstanten g; E Empfänger; G Gitter; L Linsen; B Blende; LQ Lichtquelle (inkohärent)

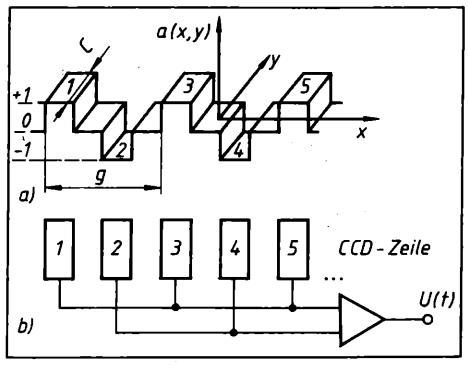


Bild 19. CCD-Zeile als Differenzgitter
a) Aperturfunktion $a(x, y)$ der als Differenzgitter geschalteten CCD-Zeile
b) Schaltung der Elemente (Pixel) der CCD-Zeile

Um ein gut auswertbares Signal zu erhalten, muß die Gitterkonstante der Teilchengröße angepaßt werden. Da der Abstand der Empfängerelemente fest vorgegeben ist, wird der Abbildungsmaßstab so gewählt, daß der Durchmesser D in der Bildebene etwas kleiner, höchstens gleich groß wie die Breite eines Empfängerelementes $D \leqq g/2$ ist.

Die Frequenz kann mit einer Genauigkeit $< 1\,\%$ bestimmt werden, wenn das Signal-Rausch-Verhältnis > 10 dB ist und 8 bis 10 Perioden für die Auswertung zur Verfügung stehen. Meßtechnische Eigenschaften der CCD-Zeile L 110 als Differenzgitter sind:

— Elementezahl	256
— Gitterperiodenzahl	128
— Gitterkonstante	$g = 26$ µm
— Länge eines Elementes	$c = 17$ µm .

Ist $\beta = 1$, so ergibt sich bei $v = 13$ mm/s die Signalfrequenz $f = 500$ Hz. Die Grenze zu hohen Geschwindigkeiten hängt von der maximalen Transportgeschwindigkeit der Ladungspakete in den Schieberegistern, der Empfindlichkeit der Wandlerelemente und dem Signal-Rausch-Verhältnis ab; 30 m/s sind erreichbar. Man kann folgende Vorteile und Nachteile erkennen:

Vorteile	Nachteile
— berührungsfreies Messen — kein kohärentes Licht erforderlich — Gleichlicht und moduliertes Fremdlicht eliminierbar — großer Meßbereich — günstig für Mehrphasenströmungen — auch für Bewegungsmessungen von Bändern, Schütt- und Walzgut geeignet	— große Richtungsempfindlichkeit — bei hoher Umgebungshelligkeit kleines Signal-Rauschverhältnis — beschränkte Meßmöglichkeit in Rohren mit stark verschmutzten Fluiden

Die Laser-Doppler-Anemometrie hat eine rasche Entwicklung und breite Anwendung erfahren. Es ist eine kalibrierungsfreie Präzisionsmeßtechnik, die neue Möglichkeiten geschaffen hat, meßtechnische Probleme der Grenzschichtströmung, der Wirbelablösung, des Überganges von der laminaren zur turbulenten Strömung oder des Durchflusses durch Kapillaren in Organen zu lösen. Das industrielle Angebot reicht von kleinen mobilen Einheiten in Baukastenform bis zu automatisierten Meßplätzen mit gesteuerter Traversierung und schneller strömungsbezogener Meßdatenverarbeitung [22] bis [25].

Grundlage für das **Meßprinzip** ist die Anwendung des optischen Doppler-Effektes, der Streuteilchen im Fluid verlangt. Sie sind zugleich Sender und Empfänger von Licht und erzeugen eine Frequenzverschiebung bei ihrer Relativbewegung zur Lichtquelle und zum Photoempfänger. Das ist die Doppler-Frequenz, die der Geschwindigkeit proportional ist.

In der Anwendung dominiert das Zwei-Strahl-Laser-Doppler-Anemometer nach Bild 20. Der Laserstrahl wird von einem Strahlteiler in zwei Teilstrahlen gleicher Intensität aufgespalten und von der Sendelinse am Meßort zum Schnitt gebracht. Hier entsteht ein gitterförmiges Interferenzfeld, in dem die Streuteilchen entsprechend dem Abstand der Interferenzflächen ein periodisches Hell-Dunkelsignal mit der Doppler-Frequenz f_D erzeugen. Das Streulicht wird auf eine Blendenöffnung fokussiert, hinter der sich der Photodetektor befindet. Das Doppler-Signal eines einzelnen Teilchens ist am Ausgang skizziert. Die Frequenz

$$f_D = 2 \cdot (\sin \Theta/2) \cdot v/\lambda \tag{31}$$

ist eine lineare Funktion der Geschwindigkeit v und nur von der Wellenlänge des Lasers λ und dem Schnittwinkel der Strahlen Θ abhängig.

Tritt das Teilchen schräg durch das Schnittvolumen, so ist der Einfallswinkel noch zu berücksichtigen.

Besondere Kennzeichen des Laser-Doppler-Anemometers (LDA) sind:

— *Messung in Rückstreuung*
Die Streustrahlung ist auch in rückwärtige Richtung detektierbar. Bild 21 zeigt den Strahlengang in einem Rückstreu-LDA. Die Sensorik erfaßt einen Kegel des rückgestreuten Lichtes und leitet das Streulicht über einen Umlenkspiegel aus dem Strahlengang auf den Signalempfänger. Das Messen in Rückstreuung erfordert höhere Strahlleistungen. Es findet dort Anwendung, wo aufgrund fehlender Transparenz eine Durchstrahlung nicht möglich ist, z. B. bei Grenzschichtuntersuchungen oder Strömungsmessung in Kapillaren vor nichttransparentem Hintergrund (Augenhintergrund).

— *Erkennung der Strömungsrichtung*
Mit Hilfe der Frequenzvorverschiebung (f_{Sh} Shiftfrequenz) ist es möglich, die Strömungsrichtung zu erkennen. Dazu wird in den Strahlengang eines Teilstrahls eine Bragg-Zelle eingeführt (z. B. $f_{Sh} = 40$ MHz) und die Shiftfrequenz der Doppler-Frequenz überlagert. Die Meßfrequenz ist dann

$$f_M = f_{Sh} \pm f_D, \tag{32}$$

die Summe oder die Differenz der beiden Frequenzen, je nach Bewegungsrichtung des Streuteilchens. Bei der Strömungsgeschwindigkeit Null mißt der Detektor die Shiftfrequenz. Dem Photodetektor ist eine Rückmischeinheit nachgeschaltet, die die Shiftfrequenz in einen günstigen Auswertebereich zurücksetzt, z. B. auf 1 MHz.

— *Messung kleinster Strömungsgeschwindigkeiten*
Die Frequenzshiftung hat zur Folge, daß sich die Interferenzflächen im Meßvolumen mit der Geschwindigkeit

$$v_{Sh} = \Delta x \cdot f_{Sh} \tag{33}$$

Δx Abstand der Interferenzflächen

bewegen. Die Meßfrequenz entsteht aus der Relativbewegung von Interferenzfeld und Streuteilchen. Damit werden noch sehr kleine Strömungsgeschwindigkeiten gut meßbar, z. B. $v = 0{,}01$ mm/s.

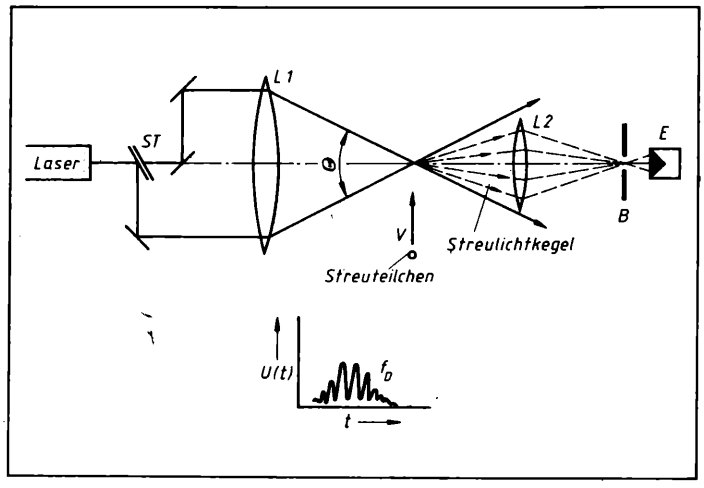


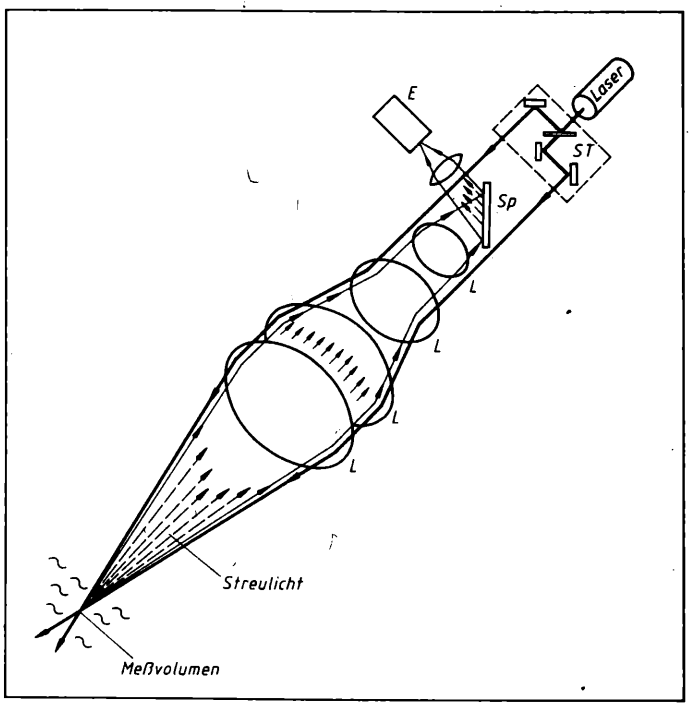
Bild 20. Zweistrahl-Laser-Doppler-Anemometer
$U(t)$ Meßsignal des Empfängers beim Durchgang eines Streuteilchens durch das Meßvolumen; *ST* Strahlteiler; *L1* Sendelinse; *L2* Empfängerlinse; *B* Blende; *E* Empfänger; v Strömungsgeschwindigkeit

— *Messung hoher Strömungsgeschwindigkeiten*
Mit breitbandiger Empfängertechnik (SEV, 450 MHz Bandbreite), leistungsstarkem Laser und schneller ECL-Technik sind obere Grenzfrequenzen von 75 MHz erreichbar [25]. Das entspricht einer Geschwindigkeit von 250 m/s.

— *Gleichzeitiges Messen mehrerer Geschwindigkeitskomponenten*
Durch gleichzeitiges Messen mehrerer Geschwindigkeitskomponenten und deren Schwankungen v_x', v_y', v_z' lassen sich die Turbulenzanteile der Scherspannungen bestimmen. Es sind die Mittelwerte der Mischprodukte $\overline{v_x' \cdot v_y'}$, $\overline{v_x' \cdot v_z'}$, $\overline{v_y' \cdot v_z'}$. Dazu wird der Laserstrahl in zwei Strahlenpaare geteilt, und zwar so, daß sich ihre Interferenzfelder senkrecht durchdringen.
Drei Methoden sind üblich:
- die Strahlenpaare haben senkrecht zueinander stehende Polarisationsebenen
- die Strahlenpaare haben unterschiedliche Shiftfrequenzen
- die Strahlenpaare haben unterschiedliche Wellenlängen (Argon-Laser: $\lambda_1 = 480$ nm; $\lambda_2 = 514{,}5$ nm).

Dreikomponenten-Meßsysteme arbeiten mit drei Strahlenpaaren von einem Argon-Laser. Der Strahl wird in zwei Farben ge-

Bild 21. LDA im Rückstreubetrieb
Sendeoptik ist gleichzeitig Empfangsoptik für Rückstreulicht aus dem Meßvolumen; *ST* Strahlteiler; *L* Linsen; *SP* Umlenkspiegel; *E* Empfänger



teilt, anschließend der blaue Strahl in ein Strahlenpaar und der grüne in zwei Strahlenpaare [26].

Anwendungen:
In Verbindung mit leistungsfähigen Signalprozessoren, Countern, Nachlauffiltern, Spektralanalysatoren oder Korrelatoren haben Laser-Doppler-Anemometer eine rasche Verbreitung in der Forschungstechnik verschiedener Disziplinen gefunden:

- **Schiffbauliches Versuchswesen** (Profile, Propeller, Schiffsmodelle) [27]
- **Chemisch-physikalisches Versuchswesen** (Mischprozesse in Flüssigkeiten und Gasen → Reaktionskinetik) [28]
- **Verbrennungssysteme und Plasmen** (hohe Gastemperaturen schließen berührende Verfahren aus) [29]
- **Kerntechnisches Versuchswesen** (Untersuchung der Keimbildung, des Wachstums und des Transports von Dampfblasen) [30]
- **Medizin** (Messungen an optisch transparenten Organen und an Organmodellen, z. B. künstliches Herz (Bild 22)) [31].

Zusammengefaßt ist folgende Bewertung der Laser-Doppler-Anemometrie möglich:

Vorteile	Nachteile
— großer Meßbereich	— Medium muß transparent sein
— berührungs- und rückwirkungsfrei	— Streuteilchen müssen vorhanden sein
— keine Kalibrierung	— hoher Aufwand
— hohe zeitliche Auflösung (10^4 Werte/s)	— für Durchflußmessungen weniger geeignet.
— hohe räumliche Auflösung ($V = 10^{-4}$ mm^3)	
— Richtungserkennung	
— gleichzeitig mehrere Komponenten meßbar.	

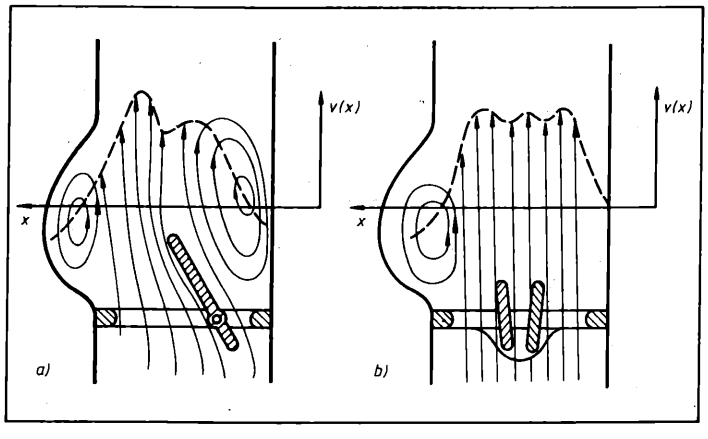
Zusammenfassung

Im Beitrag werden die Prinzipien und der gegenwärtige Stand der Strömungs- und Durchflußmeßtechnik, dabei vorzugsweise eingriffsfreie Verfahren, dargestellt. Darunter sind magnetisch-induktive, akustische, thermische und optische Methoden zu verstehen. Eine Bewertung der Verfahren erfolgt nach Aspekten der Anwendung in der industriellen Meßtechnik und in der Forschung verschiedener Disziplinen.

Literatur

[1] Boss, J.; Eichenberger, F.; Endress, U., u. a.: Durchflußfibel. 2. Ausg., Verlag FLOWTEC AG Reinach/Schweiz 1985.
[2] Strohrmann, G.: atp-Markanalyse Durchflußmeßtechnik. atp 28 (1986), 3, 4, 5 und 6.

Bild 22. LDA-Messungen von Strömungen hinter künstlichen Herzklappen
links: einteilige Herzklappe von Björk-Shiley; rechts: zweiteilige Herzklappe von Jude Medical, gestrichelte Kurve unterhalb der x-Achse kennzeichnet Rückstromgebiete



[3] Schommartz, G.: Induktive Strömungsmessung. Berlin: VEB Verlag Technik 1974.
[4] Firmenschrift: Magnetisch Induktiver Durchflußmesser (VARIOMAG-System, AUTOZERO 2000 . . .). Endress & Hauser/FLOWTEC AG Reinach/Schweiz 1985.
[5] Hertel, W.; Meyer, H.-H.; Schlüter, H.; Weise, Ch.: Induktiver Strömungsmesser. Diplomarbeit, WPU Rostock, Sektion Techn. Elektronik 1981.
[6] Mitzkus, A.; Heide, S.; Hilpert, J.; Fiedler, O.: Durchflußmeßgerät nach dem akustischen Impulslaufzeitdifferenzverfahren. WP G 01F/302 747 0 (1987).
[7] Fiedler, O.: Volumenströme und Strömungsgeschwindigkeiten turbulenter Strömungen in Rohren verschiedener Rauheit. Wiss. Zeitschr. der WPU Rostock 34 (1985) 3, S. 54—57.
[8] Bernard, H.: Ultraschall-Durchflußmessung. messen + prüfen/automatik (1983) 5, S. 258—263.
[9] Schimmelpfennig, W.; Janik, H.: Integriertes Strömungsmeßsystem. Dissertation A, WPU Rostock 1984.
[10] Firmenschrift: Minilab Model SD-12 von Sensordata a-s. Ulset/Bergen (Norwegen) 1985.
[11] Hanafusa, T.; Fujitani, T., Kobori, Y.; Mitsuta, Y.: A new Typ Sonic Anemometer-Thermometer for Field Operation. Pap. in Meteor. a. Geophys. 33 (1982) 1, S. 1—19.
[12] Lowell, F. C.; Dube, L.: Acoustic Flowmeters for Hydro-Turbine Efficiency Measurement. Firmenschrift von Accusonic Div. Ferranti ORE Inc. Falmouth MA/USA 1983.
[13] Mitzkus, A.; Heide, S.: Durchflußmeßtechnik nach akustischen Laufzeitverfahren. Dissertation A, WPU Rostock 1988.
[14] Freymuth, P.: A Bibliography of Thermal Anemometry. TSI Incorporated St. Paul MN/USA 1982.
[15] Firmenschrift: Sondenhandbuch DANTEC Elektronik. Skovlunde/Dänemark 1986.
[16] Firmenschrift: Hot Wire/Hot Film Anemometry. Probes & Accessories. TSI Inc. Vertrieb Aachen/BRD 1984.
[17] Hoffmeister, M.: Charakteristische Zeiten der Thermoanemometrie. 3. Tagung Turbulenzmeßtechnik, Report R-MECH-05/85. AdW der DDR, Inst. f. Mechanik 1985.
[18] Fiedler, O.: Moderne Strömungsmeßtechnik. msr, Berlin 26 (1983) 3, S. 122—128.
[19] Firmenschrift: Hastings Mass Flow-Instruments TELEDYNE HASTINGS-RAYDIST. Hampton, Virgina/USA (1984).
[20] Hayashi, A.; Kitagawa, Y.: Image Velocity Sensing Using an Optical Fiber Array. Appl. optics 21 (1982) 8, S. 1394—1399.
[21] Fiedler, O.; Schulz, K.-P.: Einrichtung für berührungslose Messungen an bewegten Körpern. WP 218 170 A1 (DDR). In G 01 B 11/04 (1985).
[22] Firmenschrift: Laser-Doppler-Anemometry. DANTEC Elektronik. Skovlunde/Dänemark 1986.
[23] Firmenschrift: Laser Velocimetry Systems. TSI Inc. St. Paul, Minnesota/USA 1984.
[24] Albrecht, H.-E.: Laser-Doppler-Strömungsmessung. Berlin: Akademie-Verlag 1986.
[25] Durst, F.; Melling, A.; Whitelaw, J. H.: Principles and Practise of Laser-Doppler-Anemometry. 2. Aufl. London/New York/San Francisco: Academic Press 1981.
[26] Buchhave, P.: Three-Component LDA Measurements. DISA-Information 29 (1984), S. 3—9.
[27] Kirschneck, P.; Landau, J.: Laseraufmessungen des Nachstromfeldes am Modell ohne und mit Propeller. Schiff & Hafen/Kommandobrücke 33 (1981) 4, S. 43—46.
[28] Durst, F.; Keck, Th.; Kleine, R.: Turbulence Quantities and Reynolds Stress in Pipe Flow of Polymer Solutions Measured by Two Channel Laser-Doppler-Anemometry. Proc. 6th. Symp. on Turbulence, Univ. of Missouri, Rolle/USA 1979.
[29] Kleine, R.: Literatursammlung Verbrennungssysteme. VDI-Berichte 346 (1979), S. 44—46.
[30] Negus, C. R.; Bosley, R. R.: Study of the Velocity in a Liquid Flowing Through a Partially Blocked Rod Bundle Using LDA-Technique. AERE-R-11399 Atom. Energy Research Establ. Harwell Engineering Sciences Div./USA 1984.
[31] Brass, K.-H., u. a.: Pressure Drop and Velocity Fields at Four Mechanical Heart Valve Protheses: Björk-Shiley Standard, Björk-Shiley Concave-Convex, Hall-Kaster and Jude Medical. Life Support System 1 (1983) S. 3—22.

msr 8814

O. Fiedler, K.-P. Schulz, K. Christofori

Geschwindigkeitsmessung mit CCD-Zeilenkamera nach dem Ortsfilterprinzip

0. Einleitung

Die Erfassung und Bewertung von Bewegungsvorgängen (zurückgelegter Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung) ist eine der wichtigsten Aufgaben der Prozeßmeßtechnik.

Berührungslose optische Meßverfahren stören die Objektbewegung nicht. Sie arbeiten eingriffsfrei und trägheitsarm. Das Ortsfilterverfahren mit gitterförmiger Abtastung durch CCD-Sensorzeilen wurde in [1] erstmals veröffentlicht. Es stellt geringe Anforderungen an die Objektbeleuchtung (Gleichförmigkeit, Flimmerfaktor), kann zur passiven Detektion selbstleuchtender Objekte (glühender Stahl o. ä.) eingesetzt werden und ist vorteilhaft mit weiteren CCD-Kameras zur Objektvermessung kombinierbar [2].

Nachfolgend werden das Meßprinzip und der Aufbau einer CCD-Geschwindigkeitsmeßkamera vorgestellt. Im Kamerakopf befinden sich die Ansteuerelektronik der CCD-Zeile und die Signalvorverarbeitung. Die Auswertung erfolgt mit einem angekoppelten Periodendauermesser, ausgeführt als K-1520-Modul.

Die Meßeinrichtung wurde an bewegten Metall- und Kunststoffoberflächen sowie an einem Massestrom mit zerkleinertem Pflanzgut (Strohhäcksel) getestet.

1. Geschwindigkeitsmessung nach dem Ortsfilterverfahren

1.1. Meßprinzip

Optoelektronische Geschwindigkeitsmeßanordnungen kann man unabhängig von der Beleuchtungstechnik in zwei Verfahrensgruppen einteilen, in Laufzeit- und in Ortsfilterverfahren.

Bekanntlich ist bei der Laufzeitmessung die Geschwindigkeit v aus der Zeit τ bestimmbar, die ein Objekt bzw. kontinuierliches Meßgut benötigt, um eine bekannte Strecke l zwischen zwei Sensoren zurückzulegen. Die mittlere Geschwindigkeit ergibt sich zu

$$v(t) = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{l}{\tau}. \tag{1}$$

Derartige Verfahren haben mit der Verfügbarkeit sogenannter „Industrie-Korrelatoren" [3] für die Prozeßmeßtechnik an Bedeutung gewonnen. Ortsfilterverfahren hingegen nutzen die Filterwirkung gitterförmiger Strukturen zur Bildung eines Ausgangssignales $s(t)$, dessen Maximumsfrequenz im Leistungsdichtespektrum proportional zur Geschwindigkeitskomponente mit senkrechter Orientierung zum Gitter ist.

Eine Untergliederung des Ortsfilterverfahrens kann nach der Beleuchtung in kohärent und inkohärent arbeitende Verfahren sowie nach der Gitterausführung in Gitterprojektion und Gitterabtastung erfolgen.

Bei der Gitterprojektion wird eine periodische Beleuchtungsstärkeverteilung auf dem Meßgut bzw. in einem Meßvolumen einer Strömung für die Geschwindigkeitsmessung erzeugt, z. B. im Laser-Doppler-Anemometer (LDA) nach dem Zweistrahlverfahren [4] und [5]. Das Gitter entsteht hier durch Interferenz zweier Laserstrahlen im Schnittvolumen. Das LDA eignet sich vorzugsweise für punktförmige Objektabtastungen. Die Projektion ausgedehnter Gitterstrukturen auf größere Meßobjekte erfordert allerdings leistungsstarke Lichtquellen und aufwendige Optiken.

Die geringsten Anforderungen an die Beleuchtung und Optik stellen inkohärent-optische Verfahren mit gitterförmiger Abtastung. Das Gitter ist hier als Maske zur Hell-Dunkel-Modulation des Lichtstromes vor dem integrierenden Fotosensor angeordnet (Bild 1) oder durch eine entsprechende Strukturierung des Sensors realisiert. Im Bild 2 ist das Prinzip der Signalgewinnung der Einfachgitteranordnung von Bild 1 skizziert. Wegen ihres Vorzuges, Störsignale von moduliertem Fremdlicht oder durch Flimmern der Beleuchtung zu unterdrücken, haben sich Differenzgitter durchgesetzt. Ein derartiges Differenzgitter entsteht, wie im Bild 3 dargestellt, durch zwei gegenphasig geschaltete Einfachgitter. Als Beleuchtung können z. B. industrielle Halogen-Fotoleuchten am Wechselstromnetz (220 V/50 Hz) ohne Gleichrichter verwendet werden, wobei sich im Vergleich zum Gleichstrombetrieb keine Beeinflussung des Meßsignals ergibt. Voraussetzung für eine gute Gleichtaktunterdrückung ist allerdings eine eng tolerierte gleichartige Ausführung der beiden Einfachgitter.

Die zur Objektgeschwindigkeit v proportionale Signalfrequenz f_0 ist von der Gitterkonstante g und dem Abbildungsmaßstab β abhängig

$$f_0 = \frac{v\,|\beta|}{g}. \tag{2}$$

Zur Erzielung gut auswertbarer Signalfrequenzen sind kleine Gitterabstände hoher Genauigkeit zu fordern. Die Technologie der Mikroelektronik ist in der Lage, Strukturen mit derartiger Wiederholgenauigkeit herzustellen. So beträgt nach [6] für die CCD-Sensorzeile L110C des VEB WF Berlin [7] der mittlere Elementabstand 12,998 µm bei einer Standardabweichung von 0,15 µm.

1.2. Systemtheoretische Grundlagen des Meßverfahrens

Die Funktionsweise des Ortsfilterverfahrens erklärt sich aus dem Durchlauf eines regellosen Objektmusters oder regellos verteilter Streuteilchen im Bildbereich senkrecht zur Gitterorientierung. Sind die spektralen Amplituden nicht gleichverteilt, werden eine Anpassung des Ortsfilters an die jeweilige Objektstruktur und eine Fehlerbetrachtung notwendig. Gleiches trifft zu, wenn die Bewegung nicht senkrecht zum Gitter orientiert ist. Zur Erklärung bietet sich eine systemtheoretische Analyse des Meßverfahrens an. Betrachtet man die Änderung der Signalspannung des Empfängers bezüglich der Elementarfläche $\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y$

$$\frac{\mathrm{d}u_0(t)}{\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y} = K_E a(x, y)\, E(x, y, t), \tag{3}$$

wobei K_E die Empfindlichkeit des Fotoempfängers, $E(x, y, t)$ die Bestrahlungsstärke in der Bildebene und $a(x, y)$ die Aperturfunktion des Fotoempfängers darstellen, so ergibt sich für die gesamte Empfängerfläche die Signalspannung

$$u_0(t) = K_E \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} a(x, y)\, E(x, y, t)\, \mathrm{d}x\, \mathrm{d}y. \tag{4}$$

Die Aperturfunktion des Fotoempfängers wird im wesentlichen durch die Hell-Dunkel-Modulation der Gittermaske (siehe Bild 1) oder durch die Strukturierung des Sensors selbst (aktives Gitter) bestimmt. Als Empfängerelemente haben Lichtleitfasern [8] und [9] kreisförmige Aperturen. Streifenförmige Fotodetektoren (Fotodiodenzeilen [2]) haben rechteckförmige Aperturen (Bild 4). Dazu gehört auch die CCD-Zeile. Ihre Apertur weicht aber aufgrund

---

Prof. Dr. sc. nat. Otto Fiedler wurde bereits auf S. 194 vorgestellt.

Dr.-Ing. Klaus-Peter Schulz (32) studierte von 1977 bis 1982 in der Fachrichtung Automatisierungstechnik und Technische Kybernetik an der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Technische Elektronik. Anschließend dort wissenschaftlicher Assistent. 1987 Promotion A. 1987 längerfristige Delegierung an das Vereinigte Institut für Kernforschung (VIK) in Dubna/UdSSR.

Dipl.-Ing. Klaus Christofori (28) studierte von 1980 bis 1985 in der Fachrichtung Automatisierungstechnik und Technische Kybernetik an der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Technische Elektronik. Anschließend dort wissenschaftlicher Assistent am Wissenschaftsbereich Allgemeine Elektrotechnik.

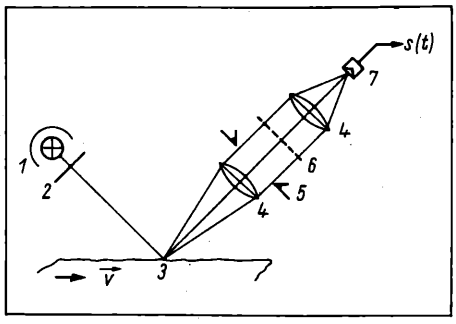


Bild 1. Ortsfilter mit Gitterabtastung
1 Beleuchtung; *2* Streuscheibe; *3* bewegtes Objekt; *4* Linsensystem; *5* Feldblende; *6* Gitter; *7* Fotoempfänger

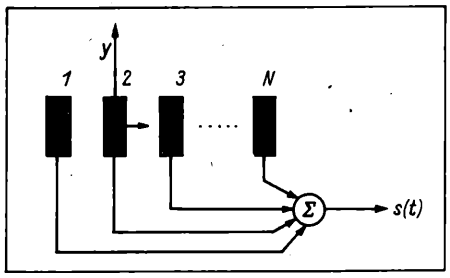


Bild 2. Einfachgitter

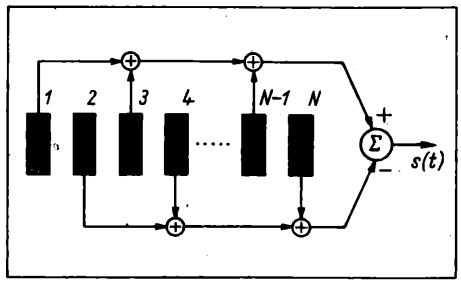


Bild 3. Differenzgitter

des Übersprechens zwischen benachbarten Elementen von der Rechteckform ab. Sie wird in x-Richtung als trapezförmig angesetzt [10] und [2] (Bild 4c). LCD-Transparenzgitter haben elektronisch veränderbare Aperturen [11].

Die Filtercharakteristik des Ortsfilters ist aus dem Spektrum des Filterausgangssignales ersichtlich. Durch Fourier-Transformation erhält man

$$U_0(f) = K_E \int_{-\infty}^{+\infty} u_0(t)\, e^{-j2\pi ft}\, dt\,. \tag{5}$$

Bei einer systemtheoretischen Betrachtung im Ortsfrequenzbereich [2] berechnet sich das resultierende Leistungsdichtespektrum $S_0(R_x, R_y)$ aus dem Ortsfrequenzleistungsdichtespektrum der Bildintensität $E(R_x, R_y)$ sowie der Fourier-Transformierten der Aperturfunktion des gitterabtastenden Empfängers $A(jR_x, jR_y)$ zu

$$S_0(R_x, R_y) = |A(jR_x, jR_y)|^2\, E(R_x, R_y)\,, \tag{6}$$

wobei R_x, R_y die Ortsfrequenzkomponenten in x- und y-Richtung darstellen.

Die Autokorrelationsfunktion des Ausgangssignales $u_0(t)$ des Ortsfilters erhält man durch Fourier-Rücktransformation:

$$s_0(t) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} |A(jR_x, jR_y)|^2\, E(R_x, R_y)\, e^{j2\pi(R_x v_x + R_y v_y)t}\, dR_x\, dR_y\,. \tag{7}$$

Bei Relativbewegung zwischen Objekt und Sensor, also einer Bewegung des Systems in x', y' bezüglich des ortsfesten Koordinatensystems x, y, verändert sich die Objekthelligkeit im betrachteten Punkt. Setzt man für die Bildintensität des bewegten Objektes

$$E(x', y') = E(x - v_x t, y - v_y t) \tag{8}$$

und berechnet die Fourier-Transformierte der Autokorrelierten $s_0(t)$, dann erhält man als Leistungsdichtespektrum des Ausgangssignales

$$S_0(f) = K_E \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} |A(jR_x, jR_y)|^2\, e^{j2\pi(R_x v_x + R_y v_y)t} \times e^{-2j\pi ft}\, dR_x\, dR_y\,. \tag{9}$$

Nach [8] ergibt sich durch Einsetzen von

$$Z(v_x t, R_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} |A(jR_x, jR_y)|^2\, E(R_x, R_y)\, e^{j2\pi R_x v_x t}\, dR_x \tag{10}$$

in [9] und Ausführen der Integration

$$S_0(f) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} Z(v_x t, R_y)\, e^{-j2\pi(f/v_x - R_y v_y/v_x)v_x t}\, dt\, dR_y \tag{11}$$

$$= \frac{K_F}{v_x} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| A\left(\left(j\frac{f}{v_x} - \frac{v_y}{v_x} R_y\right), jR_y\right)\right|^2 \times E\left(\frac{f}{v_x} - \frac{v_y}{v_x} R_y, R_y\right) dR_y\,. \tag{12}$$

Für eine Gleichverteilung aller Frequenzkomponenten im Ortsspektrum der Bildintensität des Objektes und einer Aperturfunktion gemäß Bild 4b ergibt eine numerische Näherungslösung von (12) das im Bild 5 dargestellte Spektrum. Bild 6 zeigt zum Vergleich das gemessene Spektrum eines Differenzgittersensors mit Lichtleiterzeile. Der Einsatz von genopptem Transportbandmaterial mit einem mittleren Noppenabstand $\Delta x = 6{,}25$ mm und einer mittleren ausgeprägten Ortsfrequenz von $R = 0{,}16$ LP/mm (LP Linienpaare) als Meßobjekt unterstreicht die Bedeutung einer Anpassung des Ortsfilters für praktische Anwendungen [2]. Im Signalspektrum deutlich erkennbar ist die gemäß (2) der Geschwindigkeit proportionale Maximumsfrequenz f_0.

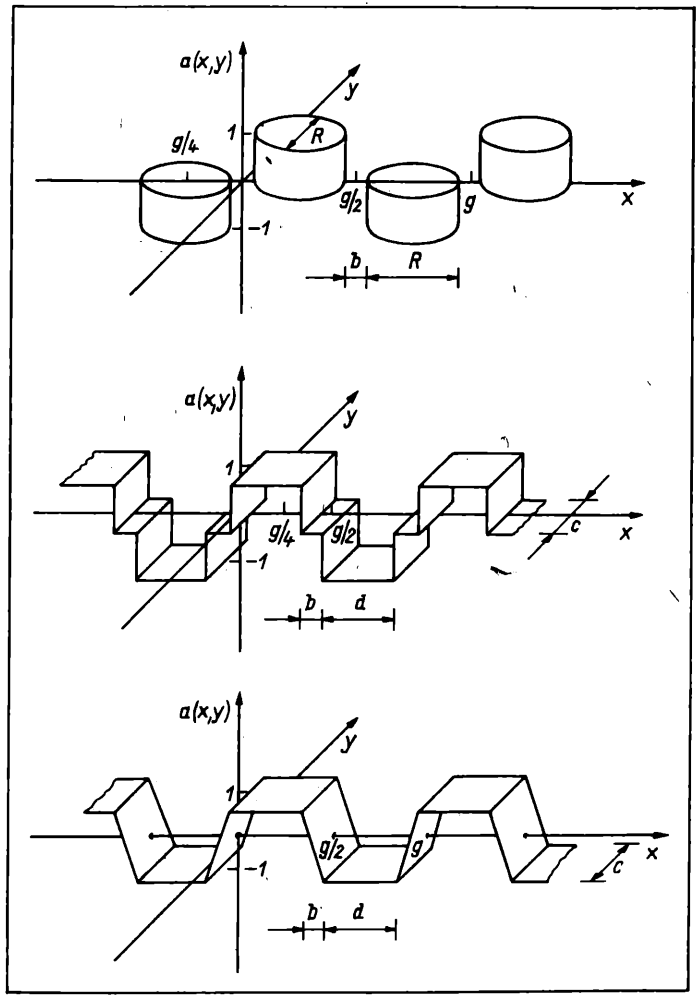
2. Einsatz einer CCD-Sensorzeile

2.1. Aufbau der CCD-Kamera

Voraussetzung für den Einsatz von CCD-Sensorzeilen als aktive Differenzgitter ist die getrennte Ansteuerbarkeit der beiden Übertragungsgates für die geradzahligen und für die ungeradzahligen Sensorelemente, wie es beispielsweise bei der L110C möglich ist.

Bild 7 zeigt den schematischen Aufbau einer Einkomponenten-

Bild 4. Normierte Ortsempfindlichkeit für Differenzgittersensoren
a) Lichtleiterzeile; b) Streifenelektroden oder Fotodiodenzeile; c) CCD-Zeile



Geschwindigkeitsmeßeinrichtung. Kernstück ist die als Ortsfilter betriebene CCD-Kamera EZK5.

Die Oberfläche des bewegten Objektes *1* wird mittels Wechselobjektiv *2* auf die CCD-Sensorzeile projiziert. In Baugruppe *5* werden durch Dekodierung der acht zyklisch auftretenden Zustände Z eines Johnsonzählers die Ansteuertakte der CCD-Sensorzeile (Φ_x, Φ_1, Φ_2, Φ_R) und die Abtastimpulse (Φ_{S1}, Φ_{S2}) für die Abtast- und Halteschaltungen *7*, *8* erzeugt. Die einzelnen Takte und ihre Phasenbeziehungen erklärt Bild 8.

Nach jedem Schieberegistertakt erfolgt die Übernahme neuer Ladungspakete in die zugeordneten Schieberegistermulden. Auf diese Weise erhält man am Ausgang OS (Output Source) einer Zeile alternierend Ladungspakete aus beiden Schieberegistern, die einzeln für sich die Summe der aus den ungeradzahligen bzw. den geradzahligen Sensorelementen ausgeschleusten Photoelektronen darstellen. Das Zeilenausgangssignal U_{OS} und das Kompensationssignal U_{CS} (Compensation Source CS) gelangen auf einen Differenzverstärker *6*, wo Störungen durch das Übersprechen der Rückstelltakte unterdrückt werden. Zwei nachgeschaltete Abtast- und Halteschaltungen *7*, *8* separieren die Ladungspakete entsprechend der Schieberegisterherkunft. Durch anschließende Differenzverstärkung in der Baugruppe *9* wird der Gleichanteil unterdrückt und das schmalbandige Ausgangssignal $u_0(t)$ bereitgestellt. Ein zusätzlich nachgeschalteter aktiver Tiefpaß 2. Ordnung *10* dient der Unterdrückung höherfrequenter Störanteile, die insbesondere durch den Abtastvorgang entstehen.

Eine anschließende Signalverarbeitung mittels Nachlauffilter oder Periodendauermesser *11* gestattet in geeigneter Weise die Detektion der Maximumsfrequenz f_0 des Ausgangssignales $u_0(t)$.

2.2. Eigenschaften der CCD-Zeilenkamera

Das Differenzgitter, das sich aus der geometrischen Struktur der CCD-Sensorzeile, ihrer Ansteuerung und der getasteten Differenzverstärkung ergibt, ist $N = 128$ Gitterperioden lang. Seine Struktur (Aperturfunktion, Gitterkonstante, Gitterperiodenzahl) hat wesentlichen Einfluß auf die Detektionseigenschaften der Kamera. Untersucht man die Signalbildung des Differenzgitters auf der Grundlage der im Abschnitt 1.2. dargestellten Zusammenhänge, so ergibt sich [2], daß z. B. mit steigender Gitterperiodenzahl N die

- Signalausgangsleistung
- Nahselektion
- Güte

des Ortsfilters wachsen. Bild 9 zeigt die Filterkurven für $N = 20$ und $N = 128$.

Ist eine v_y-Komponente vorhanden (das Objekt bewegt sich schräg zur Zeilenorientierung), so wird die Steigerung begrenzt. Die Erhöhung der Ortsfiltergüte ist z. B. bei $v_y/v_x = 0{,}05$ oberhalb $N = 30$ unbedeutend. Das weist auf die starke Richtungsabhängigkeit der Kamera hin. Diese läßt sich verringern, indem man eine Unschärfe in y-Richtung in Kauf nimmt (Verzicht auf höhere R_y-Ortsfrequenzanteile). Das kann durch Brennweitenänderung in nur einer Hauptebene mittels Zylinderlinsen erreicht werden [2].

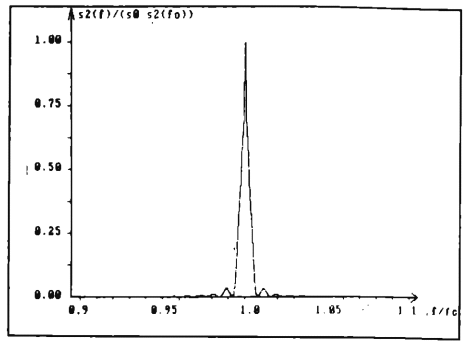
Ist das Ortsfrequenzspektrum des Objektes bandbegrenzt, so kann mit dem Abbildungsmaßstab eine Anpassung an das Ortsfilter erfolgen. Der optimale Abbildungsmaßstab ergibt sich zu

$$\beta = \frac{g}{\Delta x}, \tag{13}$$

wobei die Gitterkonstante $g = 26\ \mu m$ für die L110C und Δx die im Ortsfrequenzspektrum mit der größten Amplitude vorkommende Strukturbreite ist. Bei zunehmender Abweichung vom optimalen Abbildungsmaßstab ist ein entsprechender Abfall des Signal-Rausch-Verhältnisses (Signal to Noise Relation *SNR*) des Ausgangssignals zu verzeichnen.

Um das Ortsfrequenzspektrum zu ermitteln, ist es zweckmäßig, das Objekt im ruhenden Zustand mit einer „normal"-betriebenen CCD-Kamera bei gleicher Optik und Beleuchtungseinrichtung wie im bewegten Zustand zu beobachten. Daran schließen sich die Digitalisierung (z. B. 6 bit) und die Fourier-Transformation des Grauwertbildsignals an. Eine andere Möglichkeit besteht in der punktförmigen Abtastung des bewegten Objektes bei definierter Geschwindigkeit mit einem Photodetektor und Auswertung des Signalspektrums [2].

Bild 5. Leistungsdichtespektrum einer Ortsfilterung mit Differenz-Rechteck-Gitter
$g = 0{,}026$ mm;
$N = 128$;
$v_x = 13{,}00$ mm/s;
$v_y = 0$ mm/s;
$\Delta f = 0{,}500$ Hz; $\beta = 1$



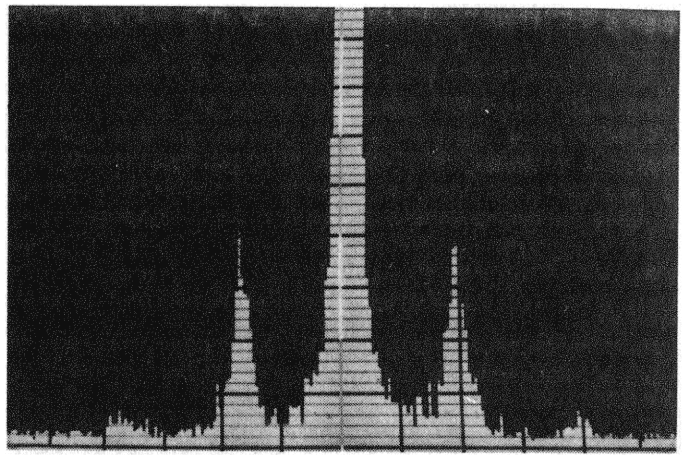


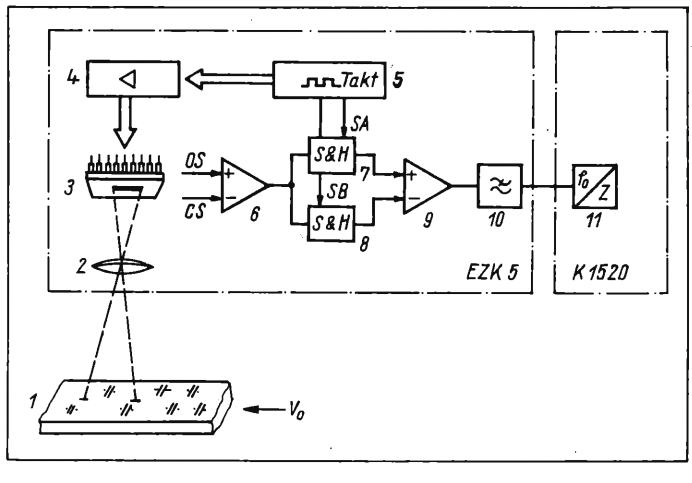
Bild 6. Leistungsdichtespektrum eines Differenzgitter-Fasersensors bei Messung der Geschwindigkeit eines Transportbandes

2.3. Signalverarbeitung

Die Signalverarbeitung erfolgt auf einem Mikrorechner K 1520 unter Verwendung eines Periodendauermessers mit internem Periodizitätstest. Der Einsatz dieser Technik erlaubt eine Kurzzeitfrequenzmessung über eine variable Anzahl von Signalperioden. Rauschbedingte Fehlmessungen einfacher Zählschaltungen durch Überschreiten der Triggerschwelle ohne Vorhandensein eines Nutzsignals oder durch mehrmaliges Registrieren von Nulldurchgängen werden durch einen ständigen Test auf Signalperiodizität beseitigt. Die Länge T_i des Eingangssignales wird mit der Länge der vorhergehenden Periode T_{i-1} verglichen. Befindet sich der neue Meßwert innerhalb eines Fehlerintervalls von:

$$T_{i-1}(1-\varepsilon) < T_i < \frac{T_{i-1}}{(1-\varepsilon)} \qquad \varepsilon = (1 \ldots 10)\%, \tag{14}$$

Bild 7. Blockschaltbild der Geschwindigkeitsmeßeinrichtung mit CCD-Zeilenkamera nach dem Ortsfilterverfahren
1 Objekt; *2* Wechselobjektiv; *3* CCD-Sensorzeile; *4* Treiber; *5* Takterzeugung; *6*, *9* Differenzverstärker; *7*, *8* Abtast- und Halteschaltung; *10* Tiefpaß; *11* Periodendauermesser



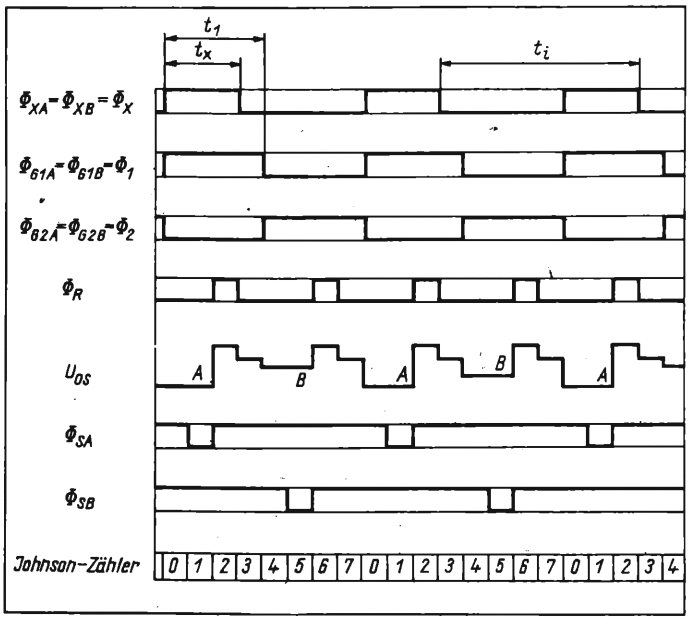


Bild 8. Taktdiagramm zur Ansteuerung der CCD-Zeile als Differenzgitter

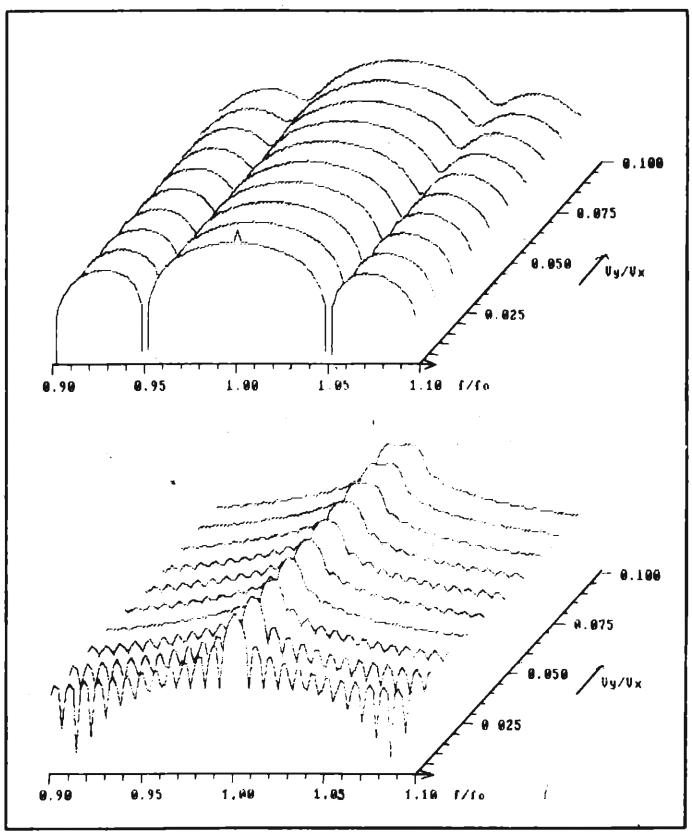
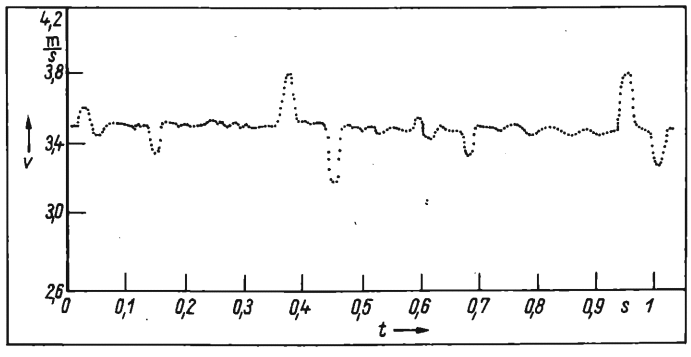


Bild 9. Abhängigkeit der Geschwindigkeitskomponenten des Leistungsdichtespektrums einer CCD-Ortsfilterung
a) $N = 20$; b) $N = 128$

Bild 10. Geschwindigkeitsverlauf einer rotierenden Scheibe (unausgewuchtet) während 2 Umdrehungen
$\Delta t = 4$ ms; $\bar{v} = 3{,}54$ m/s



erfolgt eine Periodendauerbestimmung, ansonsten wird der Meßwert verworfen. Durch Vorgabe eines festen Zeitrasters werden die Zählerstände über Ports in den Mikrorechner eingelesen und der Geschwindigkeits-Zeitverlauf ermittelt.

Besonders gut bewährte sich diese Auswertetechnik bei auftretenden Phasensprüngen im Meßsignal.

Bild 10 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf einer mit konstanter Umlaufgeschwindigkeit rotierenden Scheibe, wobei dessen Oberfläche als bewegtes Objekt betrachtet wurde. Deutlich zu erkennen sind die örtlichen Geschwindigkeitsschwankungen infolge einer Unwucht.

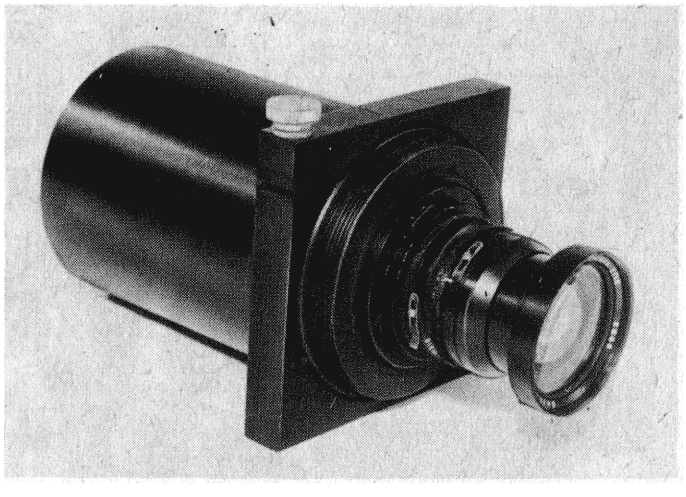
Die vorgestellte Kamera wurde weiterhin an Walzstahl, genopptem Transportband und Strohhäcksel im Auflicht erfolgreich erprobt. So konnten beispielsweise Strömungsgeschwindigkeiten in Häckslern mit bis zu 20 m/s vermessen werden.

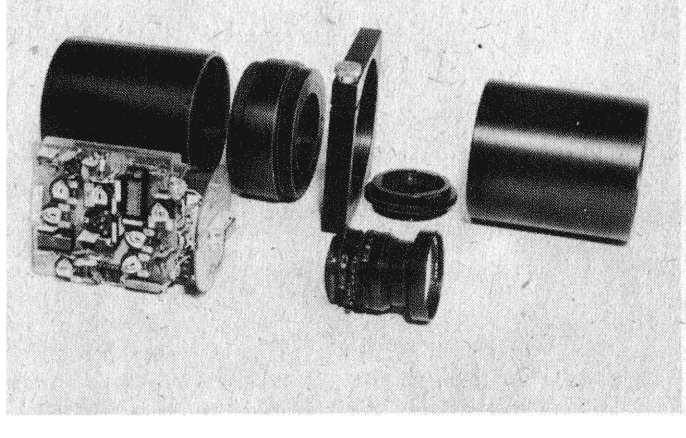
2.4. Leistungsmerkmale der realisierten Meßeinrichtung

Nachfolgend sind wesentliche Leistungsmerkmale der vorgestellten Geschwindigkeitsmeßeinrichtung zusammenfassend aufgeführt:

- zylindrischer Kameragrundkörper aus Aluminium-Dreh- bzw. Frästeilen (Bild 11)
- vollständige Kapselung von Kameraelektronik und Objektiv (Schutzgrad IP66 nach TGL 15165)
- Servicefreundlichkeit durch einzeln abnehmbare Objektiv- und Elektronikschutzkappe bei voller Funktion
- externe Gleichspannungsversorgung vom K1520 mit ± 15 V
- Ausführung der Ansteuerelektronik in CMOS
- Einsatz integrierter Abtast- und Halteschaltungen
- im Bereich von 4 ... 40 µs einstellbare Integrationszeit
- vermeßbarer Objektgeschwindigkeitsbereich von 0 bis 40 m/s (bei Einsatz eines 16 mm-Objektives und 1 m Objektabstand).

Bild 11. CCD-Zeilenkamera EZK5
links: Gesamtansicht; rechts: Explosivdarstellung





3. Zusammenfassung

Das Ortsfilter-Geschwindigkeitsmeßverfahren ist für die Prozeßmeßtechnik von praktischer Bedeutung. Es ist ein berührungsfreies Meßverfahren, das auf bewegte Objekte, die inkohärent beleuchtet werden oder auch selbst leuchten, angewendet werden kann.

Der Einsatz der CCD-Sensorzeile als Ortsfilter ist neuartig. Die Pixel der CCD-Zeile sind alternierend zusammengefaßt und als Differenzgitter ausgebildet. Das Ausgangssignal ist eine geschwindigkeitsproportionale Frequenz, die mittels Periodendauermesser in einem K1520 ermittelt wird.

Mit der vorgestellten Kamera können Objekte mit optisch wirksamer Struktur, die sich sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich bewegen, günstig vermessen werden.

Literatur

[1] SCHULZ, K.-P.; FIEDLER, O.: Einrichtung zur berührungslosen Messung an bewegten Körpern. DD WP 21870, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock 1983.

[2] SCHULZ, K.-P.; RÖHL, A.: Sichtsystem mit CCD-Zeilenkameras zur On-line-Vermessung und -Sortierung bewegter Objekte. Dissertation A, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock 1986.

[3] MASSEN, R.; WINKLER, U.; NIEDERMANN, P.: Berührungslose Geschwindigkeitsmessung mit einer Videokamera und einem Industrie-Korrelator. In: Sensoren — Technologie und Anwendung. 19. bis 21. März 1984 Bad Nauheim, VDI-Bericht, S. 69ff.

[4] ALBRECHT, H.-E.: Laser-Doppler-Strömungsmessung. Berlin: Akademie-Verlag 1986.

[5] ALBRECHT, H.-E.; KRÖGER, W.; FIEDLER, O.: Längenmessung an bewegten Objekten mit einem LDA-Meßplatz. Feingerätetechnik 33 (1984) 3, S. 126—127.

[6] HANTKE, D., u. a.: CCD-Zeilen sind Präzisionsmaßstäbe. Feingerätetechnik 33 (1985) 7, S. 290—292.

[7] L110C-Datenblatt. VEB Werk für Fernsehelektronik Berlin, 1982.

[8] HAYASHI, A.; KITAGAWA, Y.: Image velocity sensing using an optical fiber array. Applied optics 21 (1982) 8, S. 1394—1399.

[9] PETRAK, D.; ASTALOSCH, F.: Entwicklung faseroptischer Sensoren für Fluid-Feststoffströmungen. Forschungsbericht, AdW der DDR, Institut für Mechanik, Karl-Marx-Stadt, 1985.

[10] CHRISTOPH, R.; REINSCH, A.: Untersuchungen zu einem Verfahren zur Präzisionslageerkennung optisch wirksamer Strukturen. Dissertation A, Friedrich-Schiller-Universität Jena 1985.

[11] ITAKURA, Y.; SIGIMIRA, A.; TSUTSUMI, S.: Amplitude-modulated reticle constructed by a liquid crystal cell array. Applied optics 20 (1981) 16, S. 2819—2826.

msr 8816

J. Hilpert, A. Mitzkus, S. Heide, O. Fiedler

Ultraschall-Durchflußmessung nach der Clamp-on-Methode

0. Einleitung

Bei der komplexen Automatisierung von Prozessen in der stoffwandelnden, Versorgungs- und Entsorgungsindustrie, der Optimierung, Kontrolle und Überwachung von Rohrleitungstransporten ist neben leistungsfähigen Prozeßleitsystemen auch eine diesen angepaßte Sensorik zur Bestimmung der aktuellen Prozeßparameter von Interesse. Die Ermittlung von Durchflüssen spielt dabei eine immer größere Rolle. Neben anderen Durchflußmeßsystemen, wie induktiven Durchflußmessern, Korrelationsmeßsystemen, optischen Systemen und Coriolis-Messern, kommt auch der akustischen Durchflußmeßtechnik eine besondere Bedeutung zu. Die Rationalisierung von Einfahr-, Diagnose- und Reparaturprozessen (z. B. im Schiffbau) erfordert ein nichtinvasives, flexibel auf verschiedene Rohrnennweiten anwendbares Meßsystem. Diesen Anforderungen wird ein Ultraschalldurchflußmesser mit von außen auf das Rohr geklemmten Schwingern, ein sogenanntes Clamp-on-Gerät, gerecht.

1. Physikalische Grundlagen des Meßprinzips

Das Prinzip der an dieser Stelle betrachteten Ultraschalldurchflußmesser beruht auf dem Mitnahmeeffekt der Schallwellen durch die Strömung. Ein Schallimpuls wird einmal in Strömungsrichtung und zum anderen entgegen der Strömung ausgesendet. Es kommt zu einer additiven Überlagerung der Schallgeschwindigkeit mit der Komponente der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums in Schallausbreitungsrichtung. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Laufzeiten des Schallimpulses in Strömungsrichtung und zum anderen entgegen der Strömung. Im Bild 1 ist der Signalpfad des Ultraschallimpulses sowohl bei außen auf die Rohrwand geklemmten Schallwandlern als auch bei einer Schallstrecke mit Fluid-Kontakt-Schwingern dargestellt. Der Ultraschallimpuls durchläuft unter einem Winkel α das strömende Medium, wird bei der dargestellten Reflexstrecke an der Rohrrückwand reflektiert und gelangt auf den Empfangsschwinger. Die Laufzeit des Schallimpulses in Strömungsrichtung und entgegen der Strömung ergibt sich entsprechend der Gleichung

$$t_{\pm} = \frac{2d}{\cos\alpha(c_x \pm v_s)\sin\alpha} + \tau\,. \qquad (1)$$

Dabei stellen d den Rohrdurchmesser, v_s die über dem Schallpfad gemittelte Strömungsgeschwindigkeit und τ die Laufzeit außerhalb des strömenden Mediums, die sogenannte Totzeit, dar. Die Totzeit

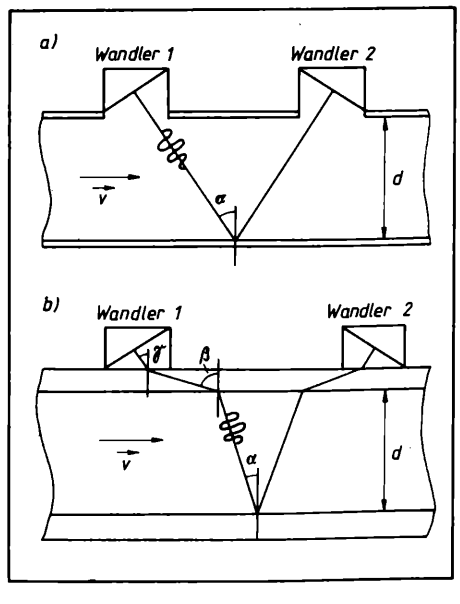


Bild 1. Ultraschallmeßstreckenanordnungen
a) Fluid-Kontakt
b) Clamp-on

Dipl.-Ing. JENS HILPERT (26) studierte von 1981 bis 1986 an der WPU Rostock. Seither dort wissenschaftlicher Assistent an der Sektion Technische Elektronik.

Dipl.-Ing. ANDREAS MITZKUS (30) studierte von 1977 bis 1982 an der TH Ilmenau. Seither Aspirant an der Sektion Technische Elektronik der WPU Rostock.

Dipl.-Ing. SIEGFRIED HEIDE (29) studierte von 1978 bis 1983 an der TH Ilmenau. Von 1983 bis 1986 Forschungsstudent an der Sektion Technische Elektronik der WPU Rostock. Seit 1987 wissenschaftlicher Mitarbeiter am ASMW Rostock.

Prof. Dr. sc. nat. OTTO FIEDLER wurde bereits auf S. 194 dieses Heftes vorgestellt.

ergibt sich aus der Laufzeit des Signals in der Elektronik, der Totzeit, die durch die Schallwandler erzeugt wird, und der Laufzeit des Schallsignals durch Gebiete, die nicht im Kontakt mit der Strömung stehen. c_x entspricht der Schallgeschwindigkeit im Fluid. Als Differenz der beiden Signallaufzeiten erhält man

$$\Delta t = \frac{2d \sin \alpha}{\cos \alpha \, c_x^2} v_s + \Delta\tau \tag{2}$$

mit der Totzeitdifferenz $\Delta\tau$, die zu Null abgeglichen werden muß. Die Summe der Signallaufzeiten, korrigiert mit der Summentotzeit, ist indirekt proportional zur Schallgeschwindigkeit des strömenden Mediums und ergibt sich zu

$$\Sigma t - \Sigma \tau = \frac{2d}{\cos \alpha \, c_x}. \tag{3}$$

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem Schallpfad erhält man aus der Laufzeitdifferenz der Ultraschallimpulse in und entgegen der Strömung, wobei der Einfluß der Schallgeschwindigkeit des strömenden Mediums mit Hilfe der Summenzeit eliminiert werden muß.

Bei einer Clamp-on-Durchflußmeßstrecke durchwandert der Ultraschallimpuls das Ankoppelstück des Schallwandlers, wird an der Grenzfläche zur Rohrwand gebrochen, durchläuft die Rohrwand und tritt nach erneuter Brechung an der Grenzfläche Rohrwand — Fluid in das strömende Medium ein. Am Empfangsschwinger wiederholt sich dieser Vorgang in umgekehrter Reihenfolge. Der Verlauf des Ultraschallsignals wird durch das Snelliussche Brechungsgesetz beschrieben

$$\frac{\sin \alpha}{c_x} = \frac{\sin \beta}{c_\beta} = \frac{\sin \gamma}{c_\gamma}. \tag{4}$$

Hierbei sind α, β, γ die Einfallswinkel des Schallstrahls im Ankoppelstück, in der Rohrwand und im Fluid sowie c_x, c_β, c_γ die entsprechenden Schallgeschwindigkeiten. Für ein Clamp-on-System ergibt sich unter Verwendung von (2) bis (4) die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem Schallpfad zu

$$v = \frac{c_\gamma}{\sin \gamma} \cdot \frac{\Delta t}{\Sigma t - \Sigma \tau}. \tag{5}$$

Die Summentotzeit $\Sigma\tau$ kann man leicht aus den geometrischen Daten der Anordnung, den Kenndaten der Schallwandler und den Verzögerungszeiten der Elektronik ermitteln. Wenn sich die Schallwandler im Direktkontakt mit dem strömenden Medium befinden, muß zur Bestimmung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit über dem Schallpfad eine c^2-Korrektur vorgenommen werden. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem Schallpfad entspricht folglich unter Verwendung von (2) und (3)

$$v_s = \frac{2d}{\cos \alpha \sin \alpha} \cdot \frac{\Delta t}{(\Sigma t - \Sigma \tau)^2}. \tag{6}$$

In beiden Fällen erhält man die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem Signalweg. Von Interesse ist jedoch der Flächenmittelwert der Strömungsgeschwindigkeit v_A. Dieser ergibt sich aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit über dem Signalweg durch Multiplikation mit einem Korrekturfaktor K

$$v_A = K \cdot v_s. \tag{7}$$

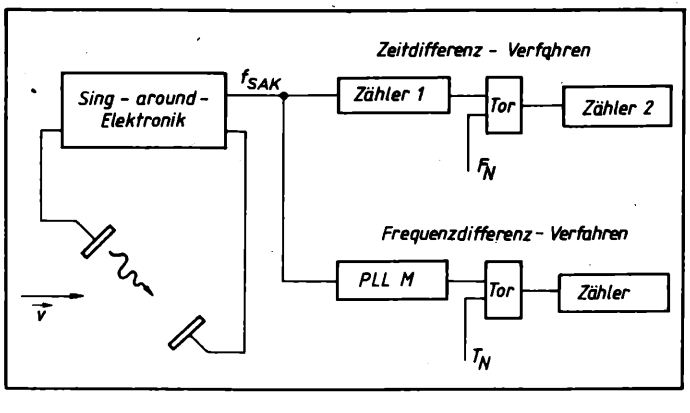
Ausgehend vom logarithmischen Geschwindigkeitsgesetz [1] in Rohren läßt sich für den Korrekturfaktor folgende implizite Formel angeben:

$$K = 2{,}12(K - 1) \ln \left[\frac{1{,}029 \nu}{v_s d_i (1 - K)} + 0{,}27 \frac{k'}{d_i} \right]. \tag{8}$$

In dieser Formel entspricht ν der dynamischen Zähigkeit, d_i dem Rohrinnendurchmesser und k' der Rohrrauhigkeit. Die Durchflußmenge Q erhält man durch Multiplikation des Flächenmittelwertes v_A mit der Querschnittsfläche

$$Q = A \cdot v_A. \tag{9}$$

Bild 2. Blockschaltbild Zeitdifferenz-/Frequenzdifferenzverfahren



2. Vergleich verschiedener Verfahren

Bei einer Nennweite $d = 100$ mm, einem Winkel $\alpha = 18°$, einer Schallgeschwindigkeit $c_x = 1480$ m/s und einer Strömungsgeschwindigkeit von $v = 1$ cm/s erhält man eine Laufzeitdifferenz der Ultraschallimpulse von $\Delta t = 0{,}3$ ns. Das bedeutet, daß man zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit mit einer Auflösung von $v = 1$ cm/s die Laufzeit des Ultraschallimpulses auf 0,3 ns genau bestimmen muß. Man benötigt also eine Zeitmeßeinrichtung, die die Laufzeit des Ultraschallsignals auf 0,3 ns genau auflösen kann. Zum anderen muß der eintreffende Empfangsimpuls auf 0,3 ns genau lokalisiert werden.

Eine Möglichkeit zur Realisierung dieser Forderungen bietet das sogenannte Sing-around-Verfahren. Beim Sing-around-Verfahren erfolgt nicht nur ein Umlauf des Ultraschallimpulses in und gegen die Strömung. Der eintreffende Empfangsimpuls wird über eine entsprechende Elektronik auf den Sendeschwinger zurückgeführt. Es entsteht ein geschlossener Signalkreislauf. Damit wird eine virtuelle Verlängerung der Meßstrecke erreicht und die Laufzeitdifferenz über die Auflösungsschwelle einer Zeitmessung mittels TTL-Schaltkreisen gehoben, die durch die obere Taktfrequenzgrenze von typisch 20 MHz gegeben ist. Unter den oben genannten Bedingungen müßten etwa 170 Umläufe in jeder Richtung absolviert werden, was einer Meßzeit für eine Signalumlaufrichtung von etwa 30 ms entspricht. Je nach Art der Signalauswertung unterscheidet man das Frequenzdifferenz- und das Zeitdifferenzverfahren. Die Wirkprinzipien beider Verfahren sind im Bild 2 dargestellt. Beim *Zeitdifferenzverfahren* wird die Laufzeit, die ein Ultraschallimpuls für eine bestimmte Anzahl N von Umläufen, vorgegeben durch den Zähler 1, benötigt, mit Hilfe einer Normalfrequenz F_N gemessen. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem Schallpfad ergibt sich für ein Clamp-on-System nach (5). Bei einer Direktkontaktstrecke erhält man ausgehend von (6) die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem Schallpfad zu

$$v_s = \frac{2d}{\cos \alpha \sin \alpha} \cdot N \cdot \frac{\Delta t}{(\Sigma t - \Sigma \tau)^2}. \tag{10}$$

Beim *Frequenzdifferenzverfahren* wird die Sing-around-Frequenz mit Hilfe eines Zeitnormals T_N ermittelt. Die Phasenregelschleife (PLL) dient zur Frequenzvervielfachung um den Faktor M und damit zur Verkürzung der Meßzeit. Bei diesem Verfahren läßt sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem Schallpfad aus der Differenzfrequenz bestimmen. Nach (1) erhält man für die vervielfachte Sing-around-Frequenz in und entgegen der Strömungsrichtung

$$f \pm = M \Big/ \left[\frac{2d}{\cos \alpha (c_\alpha \pm v_s \sin \alpha)} + \tau \right] \tag{11}$$

und damit für die Differenzfrequenz

$$\Delta f = \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{d} \cdot v_s \cdot \frac{M}{\left(1 + \tau \dfrac{c_\alpha \cos \alpha}{2d}\right)^2}. \tag{12}$$

Der Term $(\tau \cdot c_x \cdot \cos \alpha / 2d)$ stellt das Verhältnis der Totzeit zur Laufzeit des Schallsignals im strömenden Medium dar. Bei einer

Direktkontaktstrecke ist dieser bedeutend kleiner als 1, und man kann ihn vernachlässigen. Die Differenzfrequenz ist in diesem Fall unabhängig von der Schallgeschwindigkeit des strömenden Mediums, und die c-Korrektur entfällt. Damit ergibt sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem Signalpfad zu

$$v_s = \frac{d}{\sin\alpha\cos\alpha}\cdot\frac{\Delta f}{M}. \tag{13}$$

Man erhält die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_s durch einfache Multiplikation von Δf mit einer Konstanten, die durch günstige Wahl der geometrischen Abmessungen zu 1 gemacht werden kann. Da heute auch in Meßsystemen arithmetische Operationen durch Mikroprozessoren übernommen werden, ist dieser Vorteil von untergeordneter Bedeutung. Bei einer Clamp-on-Messung ist die Totzeit wesentlich größer als bei einer Fluid-Kontakt-Messung, so daß man diese nicht mehr vernachlässigen kann. Zum anderen ist der Einstrahlwinkel des Schallsignals im strömenden Medium von der Schallgeschwindigkeit abhängig. Es ist folglich bei diesen Systemen auch unter Verwendung des Frequenzdifferenzverfahrens eine Korrektur ihres Einflusses notwendig.

Beim Zeitdifferenzverfahren ist keine PLL zur Frequenzvervielfachung erforderlich, und damit entfallen Driftprobleme, hervorgerufen durch den spannungsgesteuerten Oszillator. Aus diesen Gründen wird heute verstärkt auf das Zeitdifferenzverfahren orientiert. Das oben erläuterte Sing-around-Verfahren hat den Vorteil, daß während des Meßvorganges eine zeitliche Mittelung erfolgt. Dadurch werden die Fehler bei der Empfangssignaltriggerung, die bei verrauschten Signalen entstehen, teilweise kompensiert. Die relativ langen Meßzeiten beim Sing-around-Verfahren erweisen sich allerdings in zwei Punkten als problematisch. Zum einen hat man es in den seltensten Fällen mit einem homogenen Fluid zu tun, so daß das Signal starken Schwankungen unterliegen kann und es zu Signalausfällen kommt. Beim Sing-around-Verfahren müssen aber ausnahmslos alle Umläufe hintereinander absolviert werden, um einen gültigen Meßwert zu erhalten. Zum anderen hat die Schallgeschwindigkeit in Wasser eine starke Temperaturabhängigkeit von im Mittel 3 m/s/grd. Dies führt dazu, daß Schallgeschwindigkeitsänderungen zwischen der zeitseriellen Hin- und Rückmessung als Strömungsgeschwindigkeit interpretiert werden, wobei im dargestellten Beispiel 1 cm/s Strömungsgeschwindigkeit schon bei einer Temperaturänderung von 0,002 grd zwischen Hin- und Rückmessung vorgetäuscht würde. Das alles führt zu der Forderung nach einem Meßsystem mit möglichst kurzen Meßzeiten, im Idealfall nur mit einem Hin- und Rücklauf zur Ermittlung des Meßwertes. Voraussetzung dafür ist eine hochauflösende Zeitmeßeinrichtung. Um die oben genannten 0,3 ns direkt auflösen zu können, müßte die Laufzeit des Schallsignals in der Strecke mit Hilfe eines 5 GHz-Taktes ausgezählt werden, was in der Realisierung einen hohen schaltungstechnischen Aufwand erfordern würde.

Eine Lösungsmöglichkeit stellt die Anwendung einer digitalen Phase-locked-loop-Schaltung dar, die abwechselnd auf die Sing-around-Frequenz in und entgegen der Strömung synchronisiert wird. Das digitale Steuerwort des spannungsgesteuerten Oszillators stellt im synchronisierten Zustand ein Maß für die Sing-around-Frequenz dar, und damit kann aus beiden Steuerwörtern die Strömungsgeschwindigkeit errechnet werden. Ein solches System wurde in [2] beschrieben. Zum anderen kann man in das Meßsystem eine Zeitmeßeinrichtung implementieren, wie sie prinzipiell schon aus der Technik hochauflösender Zähler bekannt ist. Eine solche Zeitmeßeinrichtung besteht aus einem Integrator, der zwischen den Flanken des Taktrasters interpoliert. Mit dessen Hilfe ist es ohne weiteres möglich, das zeitliche Raster der Taktimpulsfolge um den Faktor 100 zu untersetzen. Dabei ermöglicht die Differenzbildung im Meßprozeß einen einfachen Aufbau des Integrators. Ein durch Nichtlinearitäten des Integrators hervorgerufener Offset hebt sich durch Bildung der Zähldifferenz heraus.

3. Ausführungsbeispiel

Das realisierte Clamp-on-Durchflußmeßsystem arbeitet nach dem Sing-around-Verfahren, wobei allerdings ein Kurzzeitintegrator zur Verbesserung der Auflösung eingesetzt wurde. Damit ist es möglich,

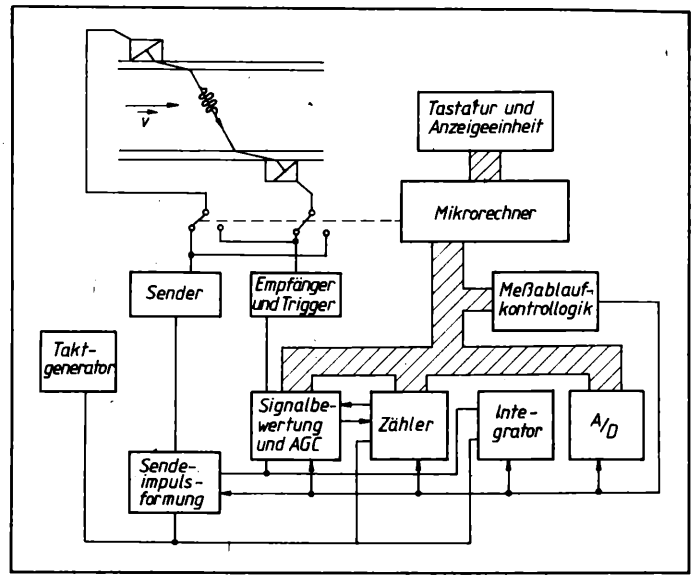


Bild 3. Blockschaltbild des Clamp-on-Meßsystems

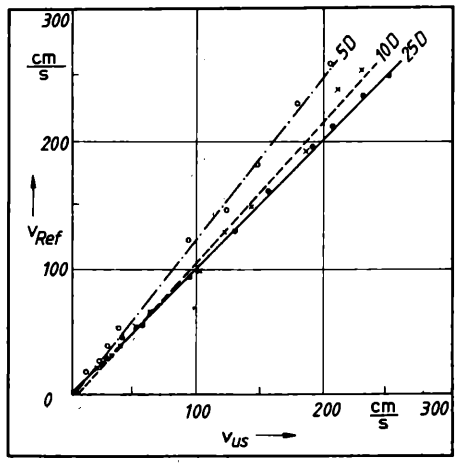


Bild 4. Aufgenommene Meßwerte in unterschiedlichen Abständen von der Störstelle
Graugußrohr GGL (d_i = 149 mm; k' = = 1,9 mm; hinter Krümmer)
$\tau \doteq 15$ µs; $c_y/\sin\gamma$ = = 4570 m/s

die Laufzeit des Schallsignals bei einem Zähltakt von 20 MHz auf 1 ns direkt aufzulösen. Das bedeutet in dem oben aufgeführten Beispiel, daß zur Erzeugung eines Meßwertes nur noch vier Umläufe in jeder Richtung notwendig sind. Bei größeren Durchmessern verringert sich diese Zahl weiter. Im Bild 3 ist der Grundaufbau dieses Systems dargestellt. Der Mikrorechner übernimmt die Steuerung des Meßablaufes und anschließend die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Durchflußmenge.

Das erste Sendesignal in einer Umlaufrichtung wird vom Mikrorechner über die Meßablaufkontrollogik taktsynchron ausgelöst. Nach dem Durchlauf durch die Schallstrecke gelangt es über den Empfangsverstärker auf einen kombinierten Flanken-Nulldurchgangstrigger, welcher entweder einen Folgeimpuls erzeugt, oder im Fall des letzten Umlaufs den Zähler stoppt. Das eintreffende Empfangssignal wird durch die Signalbewertungs- und Amplitudenkontrollogik hinsichtlich der zeitlichen Lage innerhalb eines Fensters und der Amplitudenstruktur untersucht. Im Negativfall wird die Messung verworfen und der Meßablauf von neuem gestartet.

Die Messung erfolgt in beiden Signalumlaufrichtungen. Danach wird aus den beiden Zählerständen die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem Schallpfad berechnet.

Nach (9) erhält man den Flächenmittelwert der Strömungsgeschwindigkeit v_A durch Multiplikation der mittleren Strömungsgeschwindigkeit über dem Schallpfad mit dem Korrekturfaktor K, der sich aus dem logarithmischen Geschwindigkeitsgesetz (8) ergibt.

Diese implizierte Formel wurde in einen bereichsweise linearen Zusammenhang der Form

$$K_i = a_i + b_i v_x + c_i d_i \tag{14}$$

überführt, deren Koeffizienten durch bereichsweise Fehlerquadratminimierung ermittelt wurden. Die Abweichungen zwischen (8) und (14) liegen unter 0,5 %. Der dadurch entstehende Fehler ist also

gegenüber dem Fehler durch Abweichungen des Rohrdurchmessers, des Einstrahlwinkels und der nur geschätzten Totzeit vernachlässigbar.

4. Meßergebnisse

Erste Erprobungen des Meßsystems erfolgten im Praktikum der Sektion Wasserwesen der TU Dresden und an einem Rohrleitungssystem der Sektion Melioration der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock. Im ersten Fall diente als Vergleichsgerät ein geeichtes Thomson-Wehr bzw. wurde bei kleineren Durchflüssen eine volumetrische Vergleichsmessung durchgeführt, während im zweiten Fall ein induktiver Durchflußmesser verwendet wurde. Die Messungen erbrachten den Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Systems an Rohren verschiedener Nennweiten und Rohrwandmaterialien (Stahl, Glas, PVC) mit verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten (glatt, verzinkt und bis 3 mm Rauhigkeit durch Korrosion). Ebenso wie einfache Fluid-Kontakt-Meßstrecken erfordern auch Ultraschall-clamp-on-Systeme zur genauen Bestimmung des mittleren Durchflusses ein rotationssymmetrisches Strömungsprofil, da der Meßwert verfahrensgemäß nur durch Mittlung der Strömungsgeschwindigkeit über einen Pfad gewonnen wird und dann zum Durchfluß in Beziehung gesetzt wird. Hinter Störstellen der Strömung in der Rohrleitung (Krümmer, Schieber usw.) sind deshalb längere Beruhigungsstrecken zur Herausbildung des rotationssymmetrischen Profils unumgänglich. Aus den Messungen geht hervor, daß zum Einhalten einer Fehlermarge von 5% ein Abstand von 25D zur Störstelle erforderlich ist. Bei wesentlich kürzeren Einlaufstrecken können Fehler von 10% und mehr auftreten (Bild 4).

Literatur

[1] Truckenbrodt, E.: Lehrbuch der angewandten Fluidmechanik. Berlin/Heidelberg/New York/Tokio: Springer-Verlag 1983.

[2] Akiyana, Ch., u. a.: A new concept of a single-channel PLL for ultrasonic flowmeters. Preprints FLOWMEKO. Budapest 1983.

msr 8817

J. Gätke

Akustische Strömungsgeschwindigkeits- und Durchflußmessung

0. Einleitung

Der Stand der akustischen Strömungs- und Durchflußmeßtechnik wird wesentlich von der Entwicklung der mikroelektronischen Schaltungs- und Rechentechnik sowie von der Lösung von Werkstoff- und Technologieproblemen bestimmt. Akustische Strömungsmesser haben heute kompakte Elektronikbaugruppen, die eine störsichere und schnelle Aufnahme und Verarbeitung der Meßwerte gewährleisten. Der Mikroprozessor wird zunehmend integraler Bestandteil des Meßsystems, dessen Ablauf er steuert. Er übernimmt bereits auch die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Baugruppen des Gerätes und die Kontrolle der Kalibrierung.

So liefert die Elektronik einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Eigenschaften akustischer Meßstrecken, wie

- große Meßspanne bei hoher Dynamik
- hohe Reproduzierbarkeit für mittlere und große Volumendurchflüsse
- günstige Integration in Prozeßmeßsysteme und moderne Sondensysteme
- keine Druckverluste in Rohrleitungen
- eingriffsfreie Varianten (clamp on)
- weitgehende Unabhängigkeit von Dichte, Druck, Temperatur und Zähigkeit des Fluids
- weitgehende Unabhängigkeit des technischen Aufwandes von der Nennweite.

Den Vorteilen steht allerdings aufgrund der hohen Entwicklungs- und Fertigungsaufwendungen ein hoher Preis gegenüber, insbesondere wenn die Meßfehler unter 1% bleiben sollen. So weist das Ergebnis einer Marktanalyse in Westeuropa nur einen Anteil akustischer Durchflußmesser von ungefähr 1% aus [1].

Die wachsende Nachfrage nach mobiler Durchflußmeßtechnik für die technische Diagnose wird sicher den Marktanteil in den nächsten Jahren ansteigen lassen.

1. Verfahren

Akustische Durchflußmesser sind im Prinzip Strömungsgeschwindigkeitsmesser. Die Anwendung der akustischen Effekte — Drifteffekt (Mitführungs- bzw. Ablenkungseffekt) und Doppler-Effekt — läßt in Verbindung mit Zusatzinformationen eine Aussage zum Volumendurchfluß bzw. Massedurchfluß zu. Gleiches gilt für die Messung des Strömungsgeschwindigkeitsvektors im Zusammenhang mit einem elektronischen Kompaß (Magnetometer) [2].

Unterschiedliche akustische Verfahren wurden in früheren Publikationen beschrieben [3] bis [5]. Inzwischen wird daran gearbeitet, Mikroprozessoren in Meßsysteme zu integrieren und die Anpassung an das Meßobjekt zu verbessern.

2. Einfluß der Schallgeschwindigkeit

Das ursprüngliche Laufzeitverfahren erfaßt aus einer Zeitmessung eines verdrifteten Schallimpulses, der nur die Funktion einer identifizierbaren Inhomogenität hat, in einer der Länge nach bekannten Meßstrecke die additiv überlagerten Geschwindigkeiten: Schallgeschwindigkeit im Medium c und Geschwindigkeitskomponente parallel zur Schallausbreitung der Relativbewegung des Mediums zur Meßstrecke $\bar{v}_{\parallel}$,

$$\frac{l}{t} = c \pm \bar{v}_{\parallel} = c \pm \bar{v} \cos \alpha \,. \tag{1}$$

$\bar{v}$ mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Mediums zwischen Schallsender und Empfänger (Bild 1)

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit

$$\pm \bar{v} = \left(\frac{l}{t} - c \right) \Big/ \cos \alpha \tag{2}$$

Doz. Dr. sc. techn. Johann Gätke (52) studierte von 1954 bis 1960 Physik an der Universität Rostock. Ab 1961 dort Assistent im Institut für Theoretische und Experimentelle Elektrotechnik. 1969 Promotion A (Elektrische Eigenschaften von Plastwerkstoffen). Ab 1970 wissenschaftlicher Oberassistent im WB Allgemeine Elektrotechnik der Sektion Technische Elektronik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock. 1972 Facultas docendi für das Lehrgebiet „Theoretische Elektrotechnik". 1982 Promotion B (Ein Beitrag zur hydroakustischen Meßstrecke.). 1984 auch im Bereich der Wasserwirtschaftsdirektion Küste, WRZ Warnemünde, beschäftigt. 1986 Berufung zum Dozenten an o. g. Sektion.

ist in der Regel um Größenordnungen kleiner als die Schallgeschwindigkeit, so daß eine Auswertung nach (2) selten in Frage kommt, da c und l/t mit Absolutgenauigkeiten ermittelt werden müßten, die der gewünschten Auflösung der Strömungsgeschwindigkeit mindestens gleichkämen.

Das ist der eigentliche Grund, weshalb sich die Differenzverfahren, Laufzeit- und Frequenzdifferenzverfahren, durchgesetzt haben.

Mit der Laufzeitdifferenz

$$\Delta t = t_- - t_+$$

t_-, t_+ Laufzeit der Signale gegen die und mit der Strömung stellt sich die Geschwindigkeit in Näherung dar als

$$\bar{v} \approx \frac{c^2}{2l \cos \alpha} \Delta t \,. \tag{3}$$

Mit der Frequenzdifferenz

$$\Delta f = f_+ - f_-$$

$f_+ = 1/t_+$; $f_- = 1/t_-$ Sing-around-Frequenzen

ergibt sich

$$\bar{v} = \frac{l}{2 \cos \alpha} \Delta f \,. \tag{4}$$

Obwohl sich in (4) die zu ermittelnde Geschwindigkeit $\bar{v}$ unabhängig von c darstellt, darf man nicht vergessen, daß dieser Zusammenhang unter der Voraussetzung abgeleitet wurde, daß die Schallgeschwindigkeit während des Meßvorganges, der die Mindestzeit von zwei Impulsdurchläufen erfordert, konstant bleibt. Das ist eine hohe Forderung.

Bekanntlich hängt die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur, vom Druck und von der Konzentration von Beimengungen ab [6], so daß z. B. eine Temperaturänderung von 0,01 K im Wasser während eines Meßzyklus eine Strömungsgeschwindigkeitsänderung von 2 ... 3 cm/s vortäuscht.

Auch (3) wurde unter eben dieser Voraussetzung, daß c konstant ist, abgeleitet. Für eine Auswertung nach (3) kommt hinzu, daß c absolut bekannt sein muß. Die Bestimmung des aktuellen Wertes mit hoher Genauigkeit ist nicht ganz einfach.

Diese Ultraschallverfahren haben den großen Vorteil, daß sich aus denselben Urdaten, den Laufzeiten t_+ und t_- bzw. den Impulsumlauffrequenzen f_+ und f_-, durch Differenzbildung Aussagen über die Strömungsgeschwindigkeitskomponente parallel zur Schallrichtung, d. h. zur Streckenführung, $\bar{v} \cos \alpha$ und durch Summenbildung über die Schallgeschwindigkeit c ergeben. Letztere kann damit gleichzeitig und im gleichen Volumen, d. h. unter gleichen Bedingungen, und mit gleicher Genauigkeit bzw. Auflösung ermittelt werden.

Mit den gültigen Beziehungen [4]

$$\frac{\Delta t}{\Sigma t} = \frac{\Delta f}{\Sigma f} = \frac{\bar{v} \cos \alpha}{c} \tag{5}$$

und

$$\frac{\Delta t}{\Delta f} = \frac{\Sigma t}{\Sigma f} = t_+ \cdot t_- = \frac{l^2}{c^2 - \bar{v}^2 \cos^2 \alpha} \approx \frac{l^2}{c^2} = t_0^2 \tag{6}$$

läßt sich (3) in folgende Form überführen und $\bar{v}$ durch einen einzigen Meßvorgang bestimmen

$$\bar{v} = \frac{2l}{\cos \alpha} \frac{\Delta t}{(\Sigma t)^2} \,. \tag{7}$$

$\bar{v}$ in (4) läßt sich in Verbindung mit (6) ebenfalls durch die gemessenen Laufzeiten darstellen:

$$\bar{v} \approx \frac{l}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \frac{\Delta t}{t_+ \cdot t_-} \,. \tag{8}$$

Bei Ankopplung von Schwingern über Koppelmedien an das Fluid, z. B. beim Clamp-on-Verfahren, gibt es zusätzliche Einflüsse der Schallgeschwindigkeiten dieser Koppelmedien. Hierbei ist eine Elimination bzw. Beherrschung durch das Einstellen bestimmter geometrischer Parameter, die durch das Snelliussche Brechungsgesetz vorgeschrieben werden, möglich. Es sei auf [19] verwiesen.

Um stabile Verhältnisse in der Meßstrecke voraussetzen zu können, wird man grundsätzlich zunächst auf kurze Meßzeiten orientieren. Die Mindestmeßzeit ist die Summe der Laufzeiten von zwei Ultraschallimpulsen durch die Meßstrecke (bei seriellem Meßvorgang), davon einer in Stromrichtung, der andere entgegen, d. h. $t_{M\,min} = t_+ + t_-$.

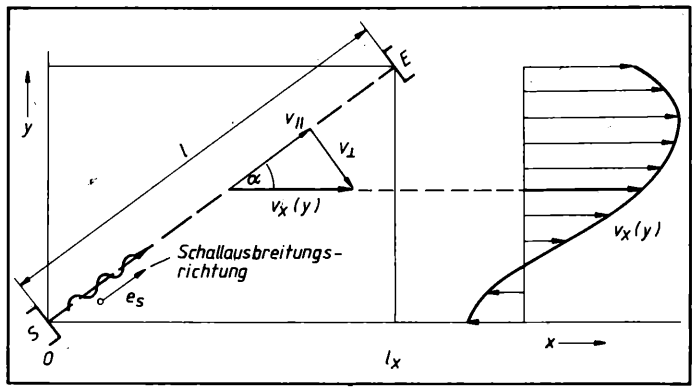


Bild 1. Akustische Meßstrecke in einem Strömungsfeld

Diese Zeit ist im wesentlichen durch die Länge der Meßstrecke l und durch die Schallgeschwindigkeit des Mediums festgelegt:

$$t_{M\,min} = (\Sigma t)_{min} = t_+ + t_- \approx 2t_0 = 2\frac{l}{c} \,. \tag{9}$$

Die Zeitmeßtechnik ist in diesen Bereichen, z. B. gelten für das Medium Wasser $c \approx 1500$ m/s und eine Streckenlänge $l = 20$ cm, technisch gut beherrschbar. Anders sieht es aus, stellt man die Forderung nach der gewünschten Auflösung der zu bestimmenden Strömungsgeschwindigkeit $\bar{v}$.

Aus (5) folgt dann

$$(\Delta t)_{min} = \frac{\bar{v}_{min} \cos \alpha}{c} \Sigma t \tag{10}$$

bzw. in Verbindung mit (9)

$$(\Delta t)_{min} \approx \frac{\bar{v}_{min} \cos \alpha}{c^2} 2l \tag{11}$$

(siehe auch (3)). Das führt bei Forderung nach Auflösung von $v = 1$ cm/s in das schwer beherrschbare Gebiet der Pikosekundenmeßtechnik.

Den technischen Ausweg bietet hier zunächst die Sing-around-Technik, auch Impulsfolgeverfahren genannt, die in [3] bis [7] beschrieben ist.

Der Vorteil besteht darin, daß man

- in Zeitbereiche kommt, die meßtechnisch gut zu beherrschen sind
- technisch aus dem Verfahren direkt Frequenzen, sogenannte Sing-around-Frequenzen bzw. Impulsfolgefrequenzen, ableiten kann und auf Frequenzmeßtechnik orientiert
- in Verbindung mit fest vorgegebenen Zeiten für die Meßdauer (Zykluszeiten) und der Frequenzdarstellung oder in Verbindung mit fest vorgegebener Anzahl von Impulsumläufen und der Zeitdarstellung zu einer reinen Zähltechnik gelangt.

Von Nachteil ist, daß die Zeit für einen Meßablauf, d. h. um einen Strömungsgeschwindigkeitsmeßwert zu gewinnen, wesentlich verlängert wird, so daß die Wahrscheinlichkeit zunimmt, daß man nicht mehr von konstanten Verhältnissen in der Strecke (und eventuell auch im Rückkopplungszweig der Elektronik) während eines Meßzyklus ausgehen kann.

Dieser Sachverhalt und auch die Forderung, die Dynamik von Strömungsprozessen mit hoher zeitlicher Auflösung darstellen zu können, bedingen die Verkürzung der Meßzeit. Das ist nur durch die technischen Lösungen

- Frequenzvervielfachung
- Nutzung einer Hilfsfrequenz

zu erreichen [4] [6] bis [8]. Hierdurch kann die Meßzeit um Größenordnungen verringert werden, so daß aktuelle Meßwerte in Zeiten von einigen Millisekunden ermittelt werden. Andere technische

Möglichkeiten der Meßzeitverkürzung, u. a. mittels Mikroprozessor, sind derzeit in Bearbeitung.

Eine zeitserielle Messung (in einer Meßstrecke und mit einer Elektronik) bietet gegenüber einer zeitparallelen Messung (in zwei Strecken mit zwei elektronischen Kreisen) insgesamt mehr Vorteile.

Bei einem Meßzyklus von einigen Millisekunden Dauer können sich Schallgeschwindigkeit und Totzeit der Elektronik merklich ändern, so daß die Meßgenauigkeit geringer wird. Derartige Meßfehler lassen sich mit Hilfe spezieller Meßstrategien verringern:

Eine technische Lösung, die den aktuellen Wert von c und seine Änderungen als Näherung berücksichtigt und die in einer Gerätekonfiguration für die Meeresforschung realisiert wurde, ist in einem Patent niedergelegt [9].

Ein anderer Grundgedanke zur Lösung dieser Probleme besteht in der in sich verschachtelten Abfolge der Messung in Stromrichtung und gegen den Strom (das entspricht der Aufhebung des Unterschiedes zwischen zeitserieller und zeitparalleler Messung). Der ständige Wechsel zwischen Hin- und Rückmessung wird als Ping-Pong-Verfahren bezeichnet [10].

Eine dritte Möglichkeit ergibt sich durch Ablauf des Meßvorganges nach einem bestimmten Zeit- und Wertungsschema. Ein aus einem mathematischen Kalkül abgeleiteter Meßablauf führte auf das sogenannte Pascal-Verfahren und das sogenannte Spiegelverfahren [11] bis [13]. Der Lösungsweg sieht so aus, daß man Lösungen eines homogenen linearen algebraischen Gleichungssystems meßtechnisch interpretiert und schaltungstechnisch realisiert. Das führt einmal zu zeitoptimalen Verfahren, den Pascal-Verfahren, und zum anderen zu den daraus hervorgegangenen zeitintensiveren, aber dafür technisch günstig umzusetzenden Spiegelverfahren. Es werden hiermit während des Meßablaufes auftretende Schallgeschwindigkeitsänderungen (beliebiger Ordnung) eliminiert oder minimiert und/oder bei gleicher Gesamtmeßzeit eine höhere Auflösung erzielt.

Die letzte Bemerkung resultiert aus Überlegungen, ein Kriterium angeben zu können, wonach unterschiedliche Verfahren der akustischen Strömungsmessung untereinander und auch mit Strömungsmeßverfahren nach anderen Prinzipien objektiv verglichen werden können. Das führte zu der gemeinsamen Bezugsgröße der Quantisierungslänge bzw. des erforderlichen minimalen Driftweges des strömenden Mediums [4] [6] [8] und [14].

Dieser jeweils verfahrensbedingte erforderliche minimale Driftweg d_{min} besagt auch, daß die Auflösung der zu ermittelnden Strömungsgeschwindigkeit $\bar{v}_{min}$ (beliebig) auf Kosten der Meßzeit (Integrationszeit) t_m heraufgesetzt werden kann und umgekehrt:

$$d_{min} = (\bar{v}t_m)_{min} = \bar{v}_{min}t_m = \bar{v}t_{m\,min}\,. \tag{12}$$

3. Akustische Signale und Totzeit

Die akustischen Signale werden für diese Zwecke durch piezoelektrische Wandler in Scheibenform, die als Dickenschwinger fungieren, erzeugt [29]. Je nach Zusammensetzung liegt der Curie-Punkt zwischen 180 °C und 300 °C, wodurch der Anwendungsbereich der Wandler begrenzt ist.

Sie werden mit Eigenfrequenzen zwischen 0,5 MHz und 10 MHz, im wesentlichen abhängig von den Dämpfungsverhältnissen in der akustischen Übertragungsstrecke, von den Genauigkeitsforderungen bezüglich der Zeitmessung und dem Verhältnis von Totzeit (im Zusammenhang mit der Signalwandlung) und Laufzeit, eingesetzt. Für den Meßbetrieb benötigt man kurze Schallimpulse, die möglichst schnell eine große Amplitude erreichen. Zum Setzen einer eindeutigen Zeitmarke muß das Schallsignal eine zeitlich stabile und steile Triggerflanke haben. Durch eine spezielle Anregung des Sendeschwingers ist das zu erreichen. Eine zweite Forderung ist, daß der Ausgangsimpuls des Empfangsschwingers möglichst kurz ist, jedenfalls so kurz, daß er bei erneuter Impulsanregung wieder eindeutig aus der Ruhelage anschwingt. Auch das ist zum Teil durch den Anregungsimpuls zu steuern, zum anderen durch die Länge der Laufstrecke (Meßstrecke). Nähere Informationen hierzu enthalten die Literaturstellen [6] [7] [26] bis [28].

Die Beziehung (1), der Ausgangspunkt aller weiteren Darstellungen zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit, besagt, daß während der gesamten in die Berechnung eingehenden Zeit die Strömung auf den Schallimpuls einwirkt. Das ist keineswegs der Fall, sondern es treten innerhalb dieser Impulslaufzeit sogenannte Totzeiten auf, in denen der Impuls keiner Beeinflussung durch die Strömung unterliegt, nämlich infolge der Impulswandlung in den Schwingern, der elektronischen Rückkopplung des Impulses beim Sing-around-Betrieb, beim Durchgang des Impulses durch Koppelmedien zur Strömungsstrecke, z. B. beim Clamp-on-Verfahren für Durchflußmessungen an Rohren, beim Durchlauf von eventuellen Totwassergebieten bei gewissen Meßstreckenanordnungen. Insgesamt muß man darauf bedacht sein, daß diese Zeitfehler unter einer vertretbaren Grenze bleiben, d. h., daß das Verhältnis von Totzeit zur Gesamtimpulslaufzeit vernachlässigbar klein ist. Das ist eigentlich nur über eine entsprechende Länge der „effektiven" Meßstrecke zu steuern. Damit ist die Wahl nach unten begrenzt. Andernfalls muß man die Totzeiten in Rechnung stellen. Speziell beim Übergang zu niedrigeren Schwingerfrequenzen erhöht sich der Totzeitanteil infolge Wandlung, weil wegen größerer Schwingungsdauern ein entsprechender zeitlicher Versatz der Triggerpunkte eintritt [6] und [16].

Die Totzeiten verursachen Fehler sowohl beim Frequenzdifferenz- als auch beim Laufzeitdifferenzverfahren. Bleiben sie konstant, so sind sie entweder durch bestimmte Setzwerte für Zähler in der weiteren Verarbeitung oder durch wiederholten Nullabgleich der Anordnung bei Anwendung eines Prozessors (Offset-Minimierung) korrigierbar.

4. Akustische Eigenschaften des Fluids

Die Anwendung des Mitführeffektes ist auf die Durchstrahlbarkeit des Fluids angewiesen. Dagegen verlagt die Anwendung des Doppler-Effektes schallstreuende Inhomogenitäten (Dichteunterschiede, Schwebeteilchen) im Fluid.

Die geometrische Dämpfung im Fluid wird bestimmt durch

- den Öffnungswinkel des Schallstrahles am Sendeschwinger, der eine Funktion der Form und Größe der abstrahlenden Fläche und der Sendefrequenz ist
- die diffuse Energiestreuung in der Schallstrecke.

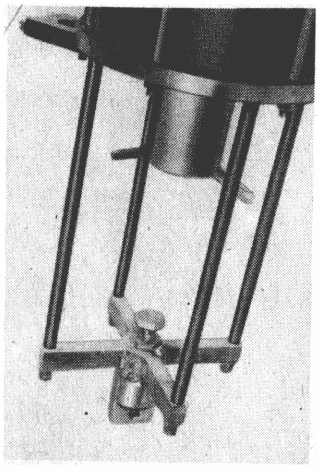
Danach läßt sich folgern, daß mit zunehmender Streuung die Dämpfung für die Laufzeitmeßstrecke zunimmt, dagegen für die Doppler-Meßstrecke abnimmt.

In bezug auf die physikalische Dämpfung gibt es zwischen Drift- und Dopplerverfahren keine Unterschiede. Der Absorptionskoeffizient für Schall ist vom Quadrat der Schallfrequenz abhängig (siehe [5]). Diese Tatsache führt dazu, entweder die Eigenfrequenz der Schallwandler um so niedriger zu wählen, je länger der Meßpfad oder je stärker die Absorption des Mediums ist oder die Sendeenergie zu erhöhen. Beides stößt auf Grenzen. Niedrige Frequenzen verringern die Genauigkeit der Zeitmessung, erhöhen die Anteile der Totzeit bezüglich der Wandler und vergrößern (bei gleichen Wandlerabmessungen) den Öffnungswinkel des Schallstrahles und damit die geometrische Dämpfung. Sie verursachen auch ein längeres Ausschwingen des Empfangsschwingers, so daß die möglichen Impulsfolgezeiten erhöht werden. Erhöhung der Sendeenergie bedeutet in der Regel höhere Spannungspegel. Hier liegen die Grenzen für Piezoschwinger bei einigen hundert Volt. Die Begrenzung liegt z. Z. bei den elektronischen Bauelementen, die die entsprechenden Leistungen mit steilen Impulsflanken als Anregungsimpuls für den Sendeschwinger schalten.

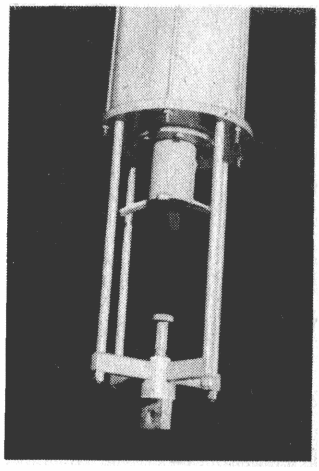
Unter Beachtung dieser Grenzen arbeiten heute akustische Strömungs- und Durchflußmesser mit Schallfrequenzen im Bereich von etwa 0,5 MHz bis 10 MHz.

5. Forderungen an die Meßstrecke

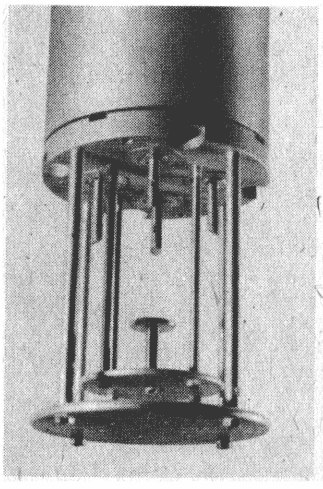
Weitere Forschungs- und Entwicklungsbemühungen konzentrieren sich auf die Verkürzung der Meß- bzw. Integrationszeit bei steigender Meßempfindlichkeit mit dem Ziel einer Quasi-Momentanwertmessung. Hohe Meßdynamik bei hoher Empfindlichkeit erlaubt



2



3



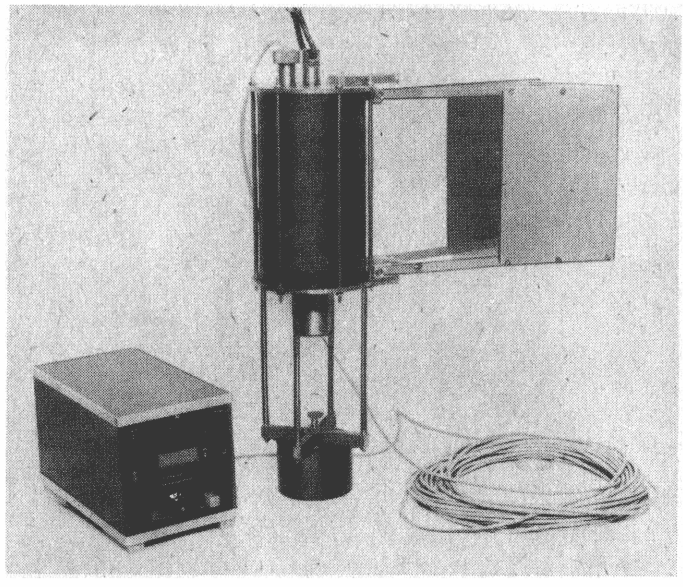
4

Bild 2. Akustische 1-Komponentenmeßstrecke, Reflektorstrecke in V-Form
Bild 3. Akustische 2-Komponentenmeßstrecke
Bild 4. Akustische 2-Komponentenmeßstrecke
Ausführung des Instituts für Meereskunde der AdW, Warnemünde
Bild 6. Akustischer Strömungsmesser für Messungen in Seen und Fließgewässern
wahlweise Netz- oder Batteriebetrieb; Strömungsmessung nach Betrag und Richtung; an Stange geführt (b) oder frei hängend mit Anströmflosse (a)

die zeitliche und bei entsprechend kurzer Meßstrecke auch die räumliche Auflösung von Feinstrukturen.

Die zeitliche Auflösung wird im wesentlichen durch die elektronische Lösung bestimmt, während die räumliche Auflösung im wesentlichen durch die konstruktive Gestaltung der Meßstrecke festgelegt wird. Nur die Meßausführung genügt höchsten Ansprüchen, bei der die elektronische auf die konstruktive Lösung abgestimmt ist. Fehler oder Unzulänglichkeiten auf der einen Seite sind durch die andere nicht oder nur teilweise zu korrigieren.

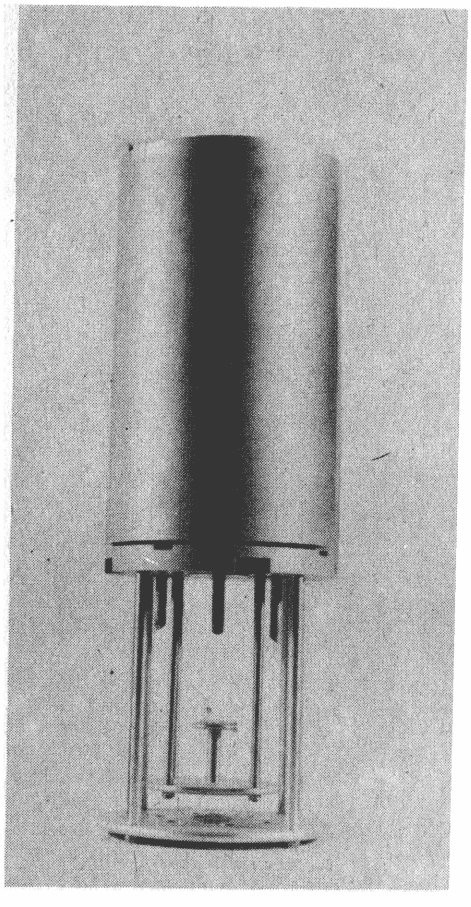
Bei Strömungsgeräten für offene Gewässer ist man gezwungen, mit Reflektorstrecken zu arbeiten. Zwei typische Ausführungen haben sich international durchgesetzt: die Streckenführung in V-Form (Bild 2) und in W-Form. Die Justage der Strecken, zumal

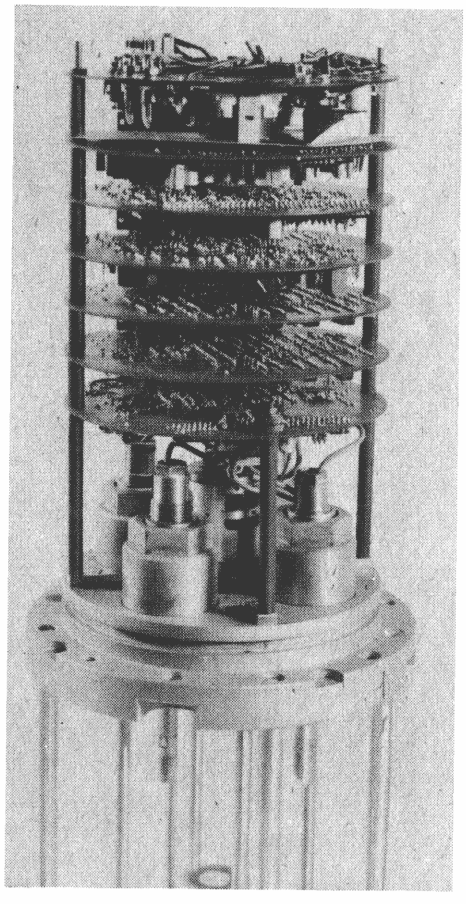


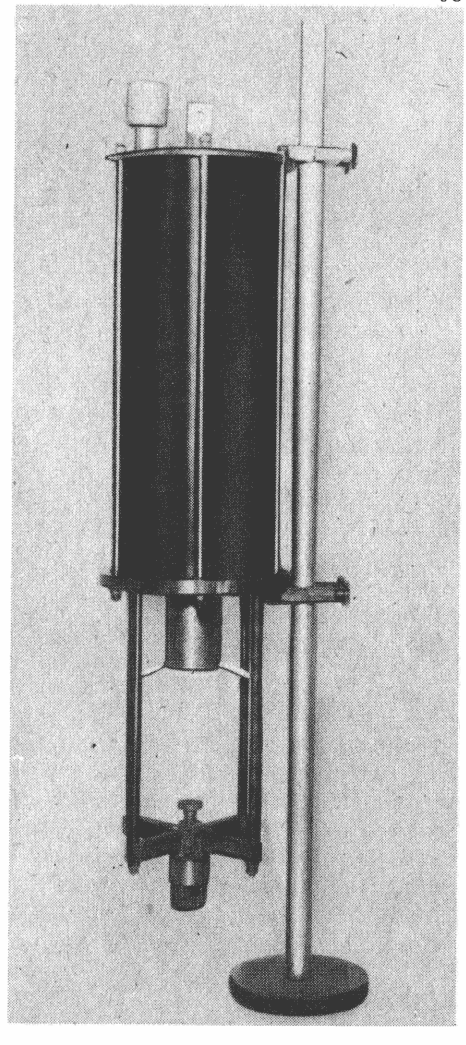
6a

6b

Bild 5. Akustischer Strömungsmesser für ozeanologische Messungen (schiffsgebundener Betrieb) des Instituts für Meereskunde der AdW, Warnemünde
Links: Außenansicht; rechts: Innenaufbau ▼







wenn man gleichzeitig zwei senkrecht zueinander angeordnete Strekken (über denselben Reflektor) betreibt (Bilder 3 und 4), um aus den beiden Komponenten den Strömungsvektor in einer Ebene bestimmen zu können [4], ist nicht ganz unproblematisch [15] und [16].

Bei akustischen Durchflußmessern für rohrgebundene Strömung gibt es eine Vielzahl von Anordnungen [17], die zwei Grundtypen beinhalten, nämlich die Geradeausstrecke bzw. die Reflexstrecke [18], die mit der vorher genannten V-Form übereinstimmt. Da es möglich ist, auch über Koppelmedien eine akustische Verbindung zum Fluid herzustellen, führt das bei rohrgebundener Strömung zum Clamp-on-Betrieb [19].

Für akustische Durchflußmessung an Rohren spielt die Beeinflussung der hydromechanischen Prozesse durch die Meßstreckenanordnung keine oder eine untergeordnete Rolle, bei Strömungsmeßgeräten für offene Gewässer aber eine entscheidende [6] und [7]. Hier ist der horizontale und vertikale Kosinustest ein aussagekräftiges Kriterium über die Güte der konstruktiven Ausführung.

Während bei zur vertikalen Achse rotationssymmetrisch aufgebauten Strömungsmessern der horizontale Kosinustest eine Aussage über die Güte der Meßstrecke macht [20], sagt der vertikale Kosinustest etwas über die Güte der Gesamtkonstruktion. Für die Beeinflussung der zu messenden Strömung durch die Meßstrecke spielt die Feinheit und Kleinheit, gleichzeitig aber auch deren Robustheit eine Rolle. Ein wichtiges Konstruktionselement sind die Schwingerköpfe bzw. Schwingerfinger. Hier ist im Hinblick auf Kleinheit und damit auf Verbesserung der strömungstechnischen Eigenschaften eine entscheidende Entwicklung gelungen (vergleiche dazu [6] und [7]). Gelöst wurde damit auch das Problem, die mechanisch sehr empfindlichen Piezoschwinger des hohen Frequenzbereiches beachtlichen äußeren Drucken (einige 10 MPa) auszusetzen, so daß Strömungsmesser mit diesen Schwingerfingern bereits in Tiefen bis etwa 5000 m für die Meeresforschung eingesetzt werden konnten (Bild 5).

6. Ergebnisse

Ergebnisse praktischer Messungen mit eigenen Anordnungen und Geräten wurden in [7] [20] [22] und [23] veröffentlicht. Für eine Serie von etwa 25 gebauten und geeichten Geräten (Bild 6) und die Ausführungen des Instituts für Meereskunde (Bild 5) wurde die nach (3) bzw. (4) zu erwartende lineare Eichkurve mit vorliegender Konstruktion im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 3 m/s bestätigt. In [20] sind die grundsätzlichen Ergebnisse dieser Entwicklungen unter folgenden Gesichtspunkten dargestellt:

a) Nullpunktfehler und Systemstabilität (Eigenrauschen) bei exakt $\bar{v} = 0$
   Dazu wurde die Meßstrecke in ein Gelatine-Wasser-Gemisch mit vernachlässigbar geringem Feststoffgehalt „eingegossen".
b) Einfluß von Schallgeschwindigkeitsänderungen
   Dazu wurden thermisch Schallgeschwindigkeitssprünge im fließenden Medium erzeugt.
c) horizontales Kosinusverhalten des Meßstreckenaufbaus
d) Übereinstimmung von zwei Labormustern, davon eines mit dem Regime der konstanten Impulsumläufe, das andere mit dem der konstanten Meßzeit im Vergleich mit den Ergebnissen, die mit einem Laser-Doppler-Anemometer gewonnen wurden.
e) Meßdynamik (Auflösung von Strömungsgeschwindigkeitsänderungen)
f) praktische Erprobung im See-Einsatz.

Für die Durchflußmessung an rohrgebundener Strömung lassen sich diese Ergebnisse mit gleichen Meßverfahren übertragen, doch liegt dort eine Schwierigkeit in der Unkenntnis des jeweils vorliegenden und von der Meßanordnung erfaßten Strömungsprofils, daß vielen nicht unbedingt kontrollierbaren Einflüssen unterliegt, um von dem ermittelten Strömungsgeschwindigkeitswert aus zunächst auf den über den Strömungsquerschnitt gemittelten Geschwindigkeitswert $\bar{v}_A$ schließen und dann nach

$$Q = \bar{v}_A \cdot A \tag{13}$$

das durch den Querschnitt A (Fließquerschnitt) durchströmende Volumen je Zeit angeben zu können. Dazu gibt es in den Grundvoraussetzungen, d. h. in der Darstellung des Strömungsprofils und seiner Abhängigkeit von Parametern recht unterschiedliche Auffassungen, weil an dieser Stelle mit empirischen Daten gearbeitet wird [1] [5] [17] [18] und [24].

Durchflußmessungen an offenen Gerinnen bedürfen in der Regel des Einsatzes von Strömungsmeßgeräten, wobei die Darstellung der Profile und des Strömungsquerschnittes einerseits [25] und das Größenverhältnis von Meßstrecke und Gerinneabmessung andererseits [21] eine gewichtige Rolle spielen.

7. Geräte

Je nach Anwendungszweck (Strömungsgeschwindigkeitsmessung, Bestimmung des Strömungsvektors, Durchflußmengenerfassung) oder Einsatzbedingungen (freie Gewässer, Fließgewässer, rohrgebundene Strömung, starr montiert, variabler Einsatz, versenkbar an Stange geführt oder am Seil frei beweglich) existiert eine Reihe konstruktiv unterschiedlicher Ausführungen der akustischen Meßstrecke, zum Teil in Verbindung mit zusätzlichen Meßsystemen bzw. Hardware- und Softwarelösungen zur Datenverrechnung, Datenübertragung und Datenanzeige.

Bild 5 zeigt den für ozeanologische Messungen für das Institut für Meereskunde der AdW der DDR, Warnemünde, entwickelten und dort realisierten akustischen Strömungsmesser [4] und [23].

Bild 6 zeigt den in Zusammenarbeit mit dem Wissenschaftlichen Gerätebau der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock realisierten Strömungsmesser, vorgesehen für Messungen in Seen (limnologische Untersuchungen), Talsperren und Fließgewässern. Beide Geräte sind mit einem Orientierungssystem [2] und [23], einem elektronischen Kompaß, der auch als separates Meßsystem genutzt werden kann — ebenfalls eine eigene Entwicklung — versehen. Für Zwecke der Durchflußmessung an Rohren wurde das akustische Meßsystem durch einen Mikrorechner ergänzt [19].

Wenn eingangs gesagt wurde, daß die akustischen Verfahren keine Anforderungen an Parameter des Fluids stellen, so heißt das, daß neben Flüssigkeiten auch Gasströmungen prinzipiell für die akustischen Verfahren zugänglich sind (z. B. [31]). Dazu liegen jedoch noch keine eigenen Erfahrungen vor.

Literatur

[1] Strohrmann, G.: atp-Marktanalyse Durchflußmeßtechnik. Automatisierungstechnische Praxis 28 (1986) 3, 4, 5, 6.
[2] Schimmelpfennig, W.; Gätke, J.: Magnetisches Orientierungssystem. Beiträge zur Meereskunde (1982) 46, AdW der DDR, Berlin.
[3] Fiedler, O.: Moderne Strömungsmeßtechnik. msr, Berlin 26 (1983) 3, S. 122—128.
[4] Gätke, J. u. a.: Akustische Strömungsgeschwindigkeitsmessung. msr, Berlin 26 (1983) 3, S. 141—146.
[5] Brand, F. L.: Akustische Verfahren zur Durchflußmessung. messen prüfen automatisieren (1987) 4, S. 198—205.
[6] Gätke, J.: Ein Beitrag zur hydroakustischen Meßstrecke. Dissertation B, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, 1982.
[7] Rennau, A.; Scheffler, Th.: Ein Beitrag zur akustischen Strömungsmessung nach dem Sing-around-Verfahren. Dissertation A, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, 1981.
[8] Gätke, J.; Rennau, A.; Scheffler, Th.: Akustische Sing-around-Verfahren zur Strömungsmessung mit verbesserter Auflösung und Empfindlichkeit. Wiss. Zeitschrift der WPU Rostock 29 (1980) 10, S. 27—29.
[9] Bestimmung des Quadrates der Schallgeschwindigkeit für akustische Strömungsmesser. WP DD 215 630 A 1 vom 20. 5. 1983.
[10] Ping-Pong-Verfahren zur Ultraschall-Strömungsmessung. WP DD 225 797 A 1 vom 9. 3. 1984.
[11] Fiedler, O., u. a.: Fehlerminimierung durch gezielten Meßablauf bei der akustischen Strömungsmessung. Wiss. Zeitschrift der WPU Rostock 34 (1985) 3, S. 72—77.
[12] Akustisches Strömungsgeschwindigkeitsmeßverfahren. WP DD 225 509 A 1 vom 19. 9. 1983.
[13] Schommartz, G.: Zum dynamischen Verhalten additive Störgrößen reduzierender Meßwertkorrekturverfahren. Wiss. Zeitschrift der WPU Rostock 34 (1985) 3, S. 78—83.
[14] Gätke, J.; Rennau, A.; Scheffler, Th.: Bemerkungen zur unteren

Meßgrenze akustischer Strömungsmeßverfahren und das Beurteilungskriterium des erforderlichen minimalen Driftweges. Beiträge zur Meereskunde (1982) 46, S. 31—36, AdW der DDR, Berlin.
[15] Baueinheit — akustische 2-Komponentenmeßstrecke. Forschungsbericht A 4. WPU Rostock, Sektion Technische Elektronik bzw. Institut für Meereskunde der AdW der DDR, Warnemünde. Dezember 1985.
[16] Optimierung der akustischen Meßstrecke für den Strömungsmesser. Forschungsbericht A 4. WPU Rostock, Sektion Technische Elektronik bzw. Institut für Meereskunde der AdW der DDR, Warnemünde Oktober 1987.
[17] KREMLEVSKIJ, P. P.: Raschodomery u sčotčiki količestva (Verbrauchs- und Mengenmessung). Leningrad 1975.
[18] GÄTKE, J.: Volumenstrommessung in geraden zylindrischen Rohren mit Hilfe akustischer Strömungsmesser. msr, Berlin 29 (1986) 4, S. 161—168.
[19] HILPERT, J.; MITZKUS, A.; HEIDE, S.; FIEDLER, O.: Ultraschall-Durchflußmessung nach der Clamp-on-Methode. msr, Berlin 31 (1988) 5, S. 210—212.
[20] GÄTKE, J.; RENNAU, A.; SCHEFFLER, TH.; STOLLE, T.: Ergebnisse praktischer Erprobung akustischer Sing-around-Strömungsmesser mit verbesserter Auflösung, Meßdynamik und Systemstabilität. Beiträge zur Meereskunde (1982) 46, S. 23—30, AdW der DDR, Berlin.
[21] GÄTKE, J.: Zur Fehlerabschätzung bei der Durchflußmessung an Oberflächengewässern mittels eines akustischen Strömungsmessers. Wasserwirtschaft — Wassertechnik 5 (1985), S. 100—102.
[22] GÄTKE, J.; RENNAU, A.; SCHEFFLER, TH.; STOLLE, T.: Ergebnisse praktischer Erprobung akustischer Strömungsmesser. Wiss. Zeitschrift der WPU Rostock 29 (1980) 10, S. 31—35.
[23] JANIK, H.; SCHIMMELPFENNIG, W.: Integriertes Strömungsmeßsystem. Dissertation A, WPU Rostock, 1984.
[24] FIEDLER, O.: Volumenströme und Strömungsgeschwindigkeit turbulenter Strömungen in Rohren verschiedener Rauheit. Wiss. Zeitschrift der WPU Rostock 34 (1985) 3, S. 54—57.
[25] GÄTKE, J.: Zur Durchflußmessung an geradlinigen Gerinnen mit kreisförmigem Querschnitt. msr, Berlin 30 (1987) 10, S. 463—469.
[26] SCHWARZ, R.: Beitrag zur Analyse des Zeitverhaltens piezokeramischer Dickenschwinger und Erzeugung zeitbegrenzter Signale. Dissertation, TH Darmstadt, 1980.
[27] PERSSON, H. W.: Electric Excitation of Ultrasound Transducers for Short Pulse Generation. Department of Electrical Measurements, Lund Institute of Technology, Report 2/1980.
[28] CHINCHURETTA: Analysis of Broadband Piezoelectric Transducers by Means of the Difference Equations Method. Dissertation, Technical University of Gdansk, Faculty of Electronics, 1984.
[29] Katalog: Piezokeramische Bauelemente. Kombinat VEB Keramische Werke Hermsdorf, Ausgabe 1985.
[30] FIEDLER, O.; SKERL, O.; SCHMIDT, W.: Akustische Doppler-Strömungsmeßverfahren. msr, Berlin 31 (1988) 5, S. 233—235.
[31] Kaijo-Denki Ultrasonic Anemometer-Thermometer. Modell DAT-300. Fa. Kaijo-Denki Tokyo.

msr 8823

H. Schlüter

Synchronisierte Kurzzeitintegration phasenempfindlich gleichgerichteter Signale

0. Einleitung

Phasenempfindliche Gleichrichter (PG) finden in der Meßtechnik vielfältige Anwendung als Demodulatoren und Korrelatoren. Die erforderliche Mittelwertbildung der Gleichrichterausgangssignale erfolgt im einfachsten Fall durch einen Tiefpaß 1. Ordnung (TP 1.0.). Wird anschließend eine Analog-Digital-Wandlung verlangt, so bietet es sich an, hierfür integrierende AD-Wandler (ADU) einzusetzen und die Integrationszeit mit dem Takt des PG zu synchronisieren. Auf den Tiefpaß kann dann unter Umständen verzichtet werden. Neben einer einfach zu realisierenden Systemstruktur ergeben sich Vorteile im dynamischen Verhalten und in den Störunterdrückungseigenschaften.

Dies wird im folgenden am Beispiel eines induktiven Strömungsmessers gezeigt.

1. Systemstruktur

Der zu betrachtende induktive Strömungsmesser arbeitet nach folgendem Prinzip: Im Meßgeber wird ein magnetisches Wechselfeld erzeugt. Die im strömenden Medium enthaltenen freien Ladungsträger bewegen sich im Magnetfeld am Meßgeber vorbei (Vorbeiflußmesser) bzw. durch denselben hindurch (Durchflußmesser) und werden durch die Lorentzkraft $\boldsymbol{F} = q(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})$ abgelenkt, bis sich ein Gleichgewicht mit der elektrostatischen Anziehungskraft zwischen den getrennten Ladungen $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$ einstellt, wodurch sich ein elektrisches Feld $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$ aufbaut. Die Meßspannung wird als Potentialdifferenz zwischen zwei Elektroden mit dem Abstand a gewonnen und ergibt sich unter Berücksichtigung einer Meßgeberkonstante k zu $U = kavB$.

Die Strömungsmesserelektronik weist im wesentlichen die aus [2] bekannte Struktur auf. Hier wird der Signalverarbeitungstrakt betrachtet, der vereinfacht im Bild 1 dargestellt ist. Gegenüber [2] wird anstelle eines Tiefpasses am Ausgang des PG ein ADU eingesetzt, der periodisch Kurzzeitintegrationen ausführt, die mit dem Takt des PG synchronisiert sind.

Nachfolgend interessieren die Signale am Eingang des PG und ihre Verarbeitung. Es sind dies: das Nutzsignal, das die Information über die Strömungsgeschwindigkeit enthält, transformatorische Störspannungen (vom Gebermagnetfeld in die Elektrodenzuleitungen induziert), 50-Hz-Netzstörungen unterschiedlicher Herkunft und Rauschen verschiedenster Quellen. Innerhalb des Aussteuerbereiches der Signalverarbeitungsbaugruppen ist das System linear. Die am Eingang des PG additiv überlagerten Signale bleiben bei der Verarbeitung unabhängig voneinander und dürfen daher im folgenden einzeln untersucht werden.

2. Nutzsignal

Zu messen ist die Strömungsgeschwindigkeit, die

$$v = \hat{V} \cos(\omega_v t - \varphi_v), \qquad 0 < \omega_v < \omega_{v\,max}, \tag{1}$$

sei. Der Meßgeber bildet das Produkt aus der Strömungsgeschwindigkeit v und der magnetischen Induktion

$$B = \hat{B} \cos \omega_B t, \tag{2}$$

womit die Meßspannung

$$u_m = kavB = ka\hat{B}\hat{V} \cos(\omega_v t - \varphi_v) \cos \omega_B t =$$

$$= \frac{1}{2} S\hat{V}\{\cos[(\omega_B - \omega_v)\, t + \varphi_v] + \cos[(\omega_B + \omega_v)\, t - \varphi_v]\},$$

$$S = ka\hat{B}, \tag{3}$$

wird, also ein amplitudenmoduliertes Signal mit der Trägerfrequenz ω_B und zwei Seitenbändern darstellt (S Gebersteilheit). Die Demodulation erfolgt durch phasenempfindliche Gleichrichtung unter Benutzung einer Rechteck-Referenzspannung u_R mit der Fourier-Reihenentwicklung

$$\frac{u_R}{C} = \frac{4}{\pi}\left(\cos \omega_B t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_B t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_B t - + \ldots\right), \tag{4}$$

Dr.-Ing. HELMUT SCHLÜTER (32) studierte von 1976 bis 1981 an der Sektion Technische Elektronik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock und diplomierte mit einer Arbeit über induktive Strömungsmesser. Von 1981 bis 1984 planmäßiger Aspirant (Hydroakustische Schallwandlerarrays). Seit 1985 Mitarbeiter der Wasserwirtschaftsdirektion Küste, Wartungs- und Reparaturzentrum Warnemünde. 1986 Promotion A zum Thema „Hydroakustische Gruppenstrahler für eine Variante der vertikalen Impulsortung".

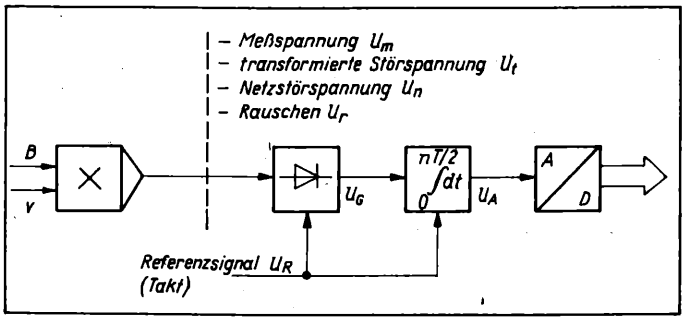


Bild 1. Vereinfachtes Blockschaltbild des Signalverarbeitungstraktes

die in Phase mit der magnetischen Induktion B ist.

Das Produkt von Meßspannung und Referenzsignal ergibt das Ausgangssignal des PG

$$u_{Gm} = \frac{2}{\pi} S\hat{V} \left\{ \cos(\omega_v t - \varphi_v) + \right.$$
$$+ \frac{1}{3}[\cos((2\omega_B - \omega_v)\, t + \varphi_v) +$$
$$+ \cos((2\omega_B + \omega_v)\, t - \varphi_v)] +$$
$$- \frac{1}{15}[\cos((4\omega_B - \omega_v)\, t + \varphi_v) +$$
$$\left. + \cos((4\omega_B + \omega_v)\, t - \varphi_v)] + - \ldots \right\}. \qquad (5)$$

Die hier auftretenden Nutzsignalspektren sind im Bild 2 skizziert.

Der sich anschließende ADU bildet während der Meßzeit $nT/2$ den Mittelwert des Gleichrichterausgangssignales und kann daher als im Zeitbereich idealer Kurzzeitintegrator mit der Gewichtsfunktion

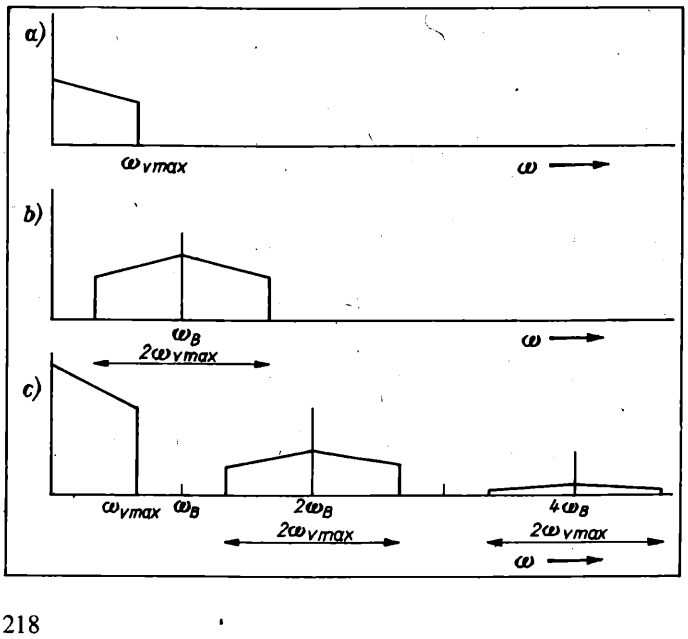
$$g(t) = \begin{cases} \dfrac{1}{nT/2} & \text{für} \quad t_0 < t < t_0 + nT/2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \qquad (6)$$

beschrieben werden, wobei $T = 2\pi/\omega_B$ der Periodendauer der magnetischen Induktion B entspricht.

Das Meßergebnis ist daher

$$u_{Am} = \int_{t_0}^{t_1} g(t - t')\, u_{Gm}(t')\, dt' = \frac{1}{n\frac{T}{2}} \int_{t_0}^{t_0 + nT/2} u_{Gm}(t)\, dt$$

Bild 2. Spektren
a) Strömungsgeschwindigkeit v; b) Meßspannung u_m; c) Ausgangsspannung des phasenempfindlichen (Zweiweg-)Gleichrichters u_{Gm}



$$= \frac{2}{\pi} S\hat{V} \left\{ \operatorname{si} n\pi \frac{\omega_v}{\omega_B} \cos\varphi - \frac{1 - \cos n\pi \dfrac{\omega_v}{\omega_B}}{n\pi \dfrac{\omega_v}{\omega_B}} \sin\varphi + \right.$$
$$+ \frac{1}{3}\left[\operatorname{si} n\pi \left(2 - \frac{\omega_v}{\omega_B}\right) \cos\varphi + \right.$$
$$+ \frac{1 - \cos n\pi \left(2 - \dfrac{\omega_v}{\omega_B}\right)}{n\pi \left(2 - \dfrac{\omega_v}{\omega_B}\right)} \sin\varphi + \operatorname{si} n\pi \left(2 + \frac{\omega_v}{\omega_B}\right) \cos\varphi +$$
$$\left. \left. - \frac{1 - \cos n\pi \left(2 + \dfrac{\omega_v}{\omega_B}\right)}{n\pi \left(2 + \dfrac{\omega_v}{\omega_B}\right)} \sin\varphi \right] - + \ldots \right\} \qquad (7)$$

für $n = 1, 2, 3, \ldots$ und mit $\varphi = t_0\omega_v - \varphi_v$.

Wie Bild 3 für $n = 1$ bzw. $n = 2$ in die Integration einbezogene Halbperioden $T/2$ zeigt, handelt es sich im Falle $\varphi = 0$ um eine Summe von Spaltfunktionen, die bei $\omega_v/\omega_B = \ldots, -4, -2, 0, +2, +4, \ldots$ zentriert sind, und deren Amplituden mit wachsendem Abstand ihres Zentrums vom Koordinatenursprung abnehmen. Tritt eine Phasenverschiebung zwischen dem Beginn des Integrationsintervalls und dem Maximum der betrachteten Spektralkomponente der Strömungsgeschwindigkeit auf, so werden die Spaltfunktionen durch Terme der Form $(1 - \cos x)/x$ modifiziert. (7) gibt an, mit welcher Wichtung die im Strömungsgeschwindigkeitsspektrum enthaltenen Anteile unter Berücksichtigung ihrer Phasenlagen in den Mittelwert am Ausgang des Kurzzeitintegrators eingehen. Eine einmalige Messung liefert daher einen Wert, über dessen erzeugendes Signalspektrum nur aufgrund von A-priori-Informationen Aussagen getroffen werden können. Praktisch werden dagegen Wiederholmessungen auszuführen sein, wobei zu beachten ist, daß die Abtastwerte hier nicht Momentanwerte einer Zeitfunktion, sondern Mittelwerte darstellen.

Es ist nun zu sichern, daß

- höherfrequente Komponenten der Meßgröße, deren Betragsmeßfehler eine zulässige Größe überschreitet, keinen wesentlichen Beitrag zum Mittelwert mehr liefern (Bandbegrenzung)
- die Mittelwertbildung in so dichten Zeitabständen wiederholt wird, daß das (bandbegrenzte) Meßsignal aus den Abtastungen rekonstruiert werden kann.

Die Bandbegrenzung kann entweder im Prozeß selbst begründet sein oder durch das Meßgerät erfolgen, beispielsweise über die räumlichen Mittelungseigenschaften des Meßgebers (kleinskalige und damit höherfrequente Strömungsgeschwindigkeitsänderungen werden unterdrückt) als auch durch Tiefpaßfilterung an geeigneter Stelle im Meßverstärker (etwa zwischen PG und Kurzzeitintegrator, also wie in der betrachteten analogen Referenzstruktur, aber mit anderer Funktion des TP). Zur Bestimmung des Betragsmeßfehlers genügt für $0 < n\omega_v/\omega_B < 1$ die Betrachtung der bei Null zentrierten Anteile si(x) bzw. $(1 - \cos x)/x$ in (7). Normiert wird auf den Mittelwert des $\cos\varphi$ im Integrationsintervall, womit der Betragsfehler von φ unabhängig wird. Hieraus ergibt sich die Näherung

$$F = 1 - \frac{\operatorname{si}\left(n\pi \dfrac{\omega_v}{\omega_B}\right)}{\cos\left(n\pi \dfrac{\omega_v}{2\omega_B}\right)}, \qquad (8)$$

wie im Bild 4 dargestellt (zum Vergleich: $1 - \operatorname{si}(n\pi(\omega_v/\omega_B))$). Meßtechnisch nutzbar mit Fehlern kleiner 2% ist der Bereich $0 < n\omega_v/\omega_B < 0{,}2$. Durch Bandbegrenzung ist also zu sichern, daß $\omega_v < \omega_B/5n$.

Die Abtastperiode T_a ist bei dem hier verwendeten AD-Wandler-

system C 500 mit der Meßzeit fest verkoppelt und ist 4mal so groß:

$$T_a = 4nT/2 = 4n\frac{\pi}{\omega_B},$$
$$T_a < \frac{4n\pi}{5n\omega_{v\,max}} = \frac{2}{5}\frac{1}{f_{v\,max}} = \frac{2}{5}T_{v\,min}. \tag{9}$$

Das Abtasttheorem wird somit eingehalten.

Für möglichst hohe Grenzfrequenz des Meßsystems ist $n = 1$, also eine Integrationszeit von einer halben Periode der Betriebsfrequenz ω_B zu wählen. Inwieweit dies zulässig ist, zeigen die folgenden Betrachtungen zur Störsignalunterdrückung.

Zunächst ist jedoch noch ein Vergleich mit den bei Tiefpaßfilterung erzielten dynamischen Meßgeräteeigenschaften angebracht. Bei Verwendung eines TP 1.0. wäre nach [1]

$$u_{Am} = \frac{2}{\pi}S\hat{V}\left\{\frac{\cos[\omega_v t - \varphi(\omega_v)]}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega_v}{\omega_g}\right)^2}} + \right.$$
$$+\frac{1}{3}\frac{\cos[(2\omega_B-\omega_v)t - \varphi(2\omega_B-\omega_v)]}{\sqrt{1+\left(\frac{2\omega_B-\omega_v}{\omega_g}\right)^2}} +$$
$$\left.+\frac{1}{3}\frac{\cos[(2\omega_B+\omega_v)t - \varphi(2\omega_B+\omega_v)]}{\sqrt{1+\left(\frac{2\omega_B+\omega_v}{\omega_g}\right)^2}} + \ldots\right\}. \tag{10}$$

Vom Phasenfehler abgesehen sind hier zwei Fehleranteile von Bedeutung:

1. ein Amplitudenfehler des interessierenden Signales

$$F = 1 - \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega_v}{\omega_g}\right)^2}} \tag{11}$$

2. überlagerte Störungen, verursacht durch die Modulationsprodukte des PG, die in der Meßpraxis einen zufälligen Fehler erzeugen. Der Anteil um die Frequenz $2\omega_B$ ist der größte, so daß dessen Betrachtung für eine Abschätzung ausreicht:

$$\hat{U}_{Stör} = \frac{2}{\pi}S\hat{V}\frac{1}{3}\left\{\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2\omega_B-\omega_v}{\omega_g}\right)^2}} + \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2\omega_B+\omega_v}{\omega_g}\right)^2}}\right\}. \tag{12}$$

Im Bild 5 sind F und $\hat{U}_{Stör}$ normiert als Funktion von ω_v/ω_B mit ω_g/ω_B als Parameter aufgetragen. Bei $\omega_g = 0{,}1\omega_B$ liegt die Amplitude des Störanteils noch bei über 3%. Bei einem zulässigen Amplitudenmeßfehler von 2% reicht der Meßbereich dann bis etwa $\omega_v = 0{,}02\omega_B$, womit sich die Tiefpaßfilterung als der synchronisierten Kurzzeitintegration unterlegen erweist.

Bei einer Betriebsfrequenz $f = 25$ Hz ist zum Beispiel mit synchroner Kurzzeitintegration und $n = 1$ eine obere Grenzfrequenz des Meßgerätes von 5 Hz zu erzielen, dagegen mit Tiefpaßfilterung ($f_g = 2{,}5$ Hz) eine Gerätegrenzfrequenz von 0,5 Hz, wobei die Störanteile noch nicht zu vernachlässigen sind.

3. Transformatorische Störspannung

Die transformatorische Störspannung wird in die von den Elektrodenzuleitungen und der Elektrodenverbindungslinie gebildete Schleife induziert und weist zum Nutzsignal bei $\omega_v = 0$ eine Phasenverschiebung von $\pi/2$ auf:

$$u_t = \hat{U}_t \cos(\omega_B t - \pi/2) = \hat{U}_t \sin\omega_B t. \tag{13}$$

Durch Multiplikation mit dem Rechteck-Referenzsignal (4) ergibt sich das Ausgangssignal des PG bezüglich u_t zu

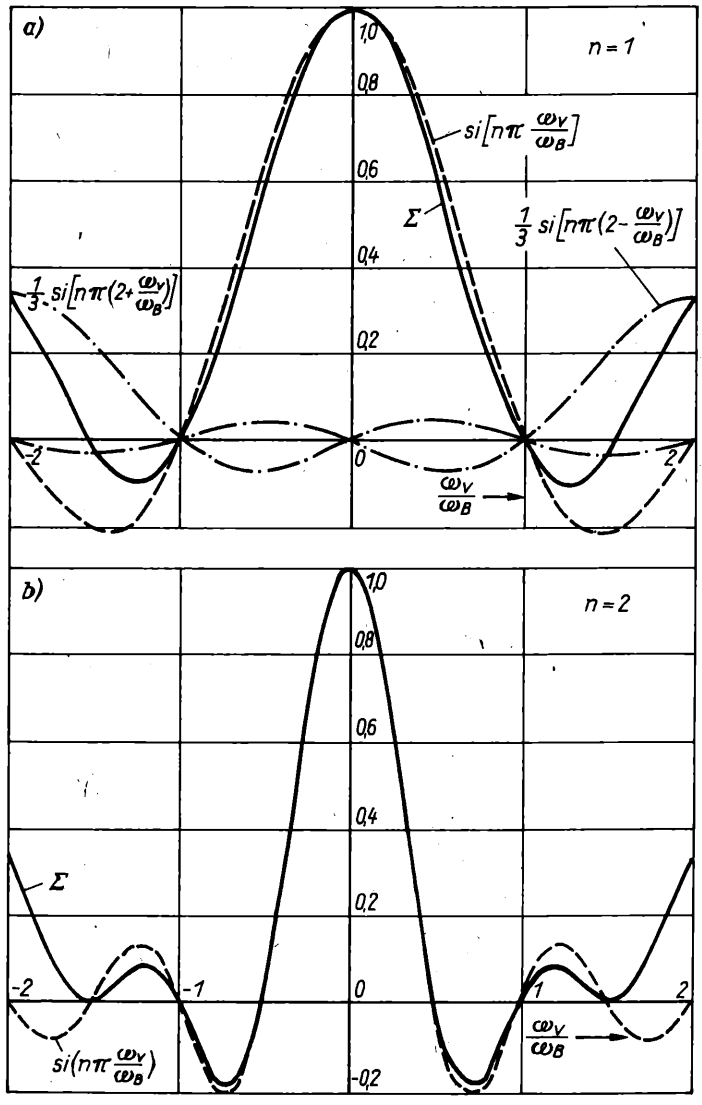
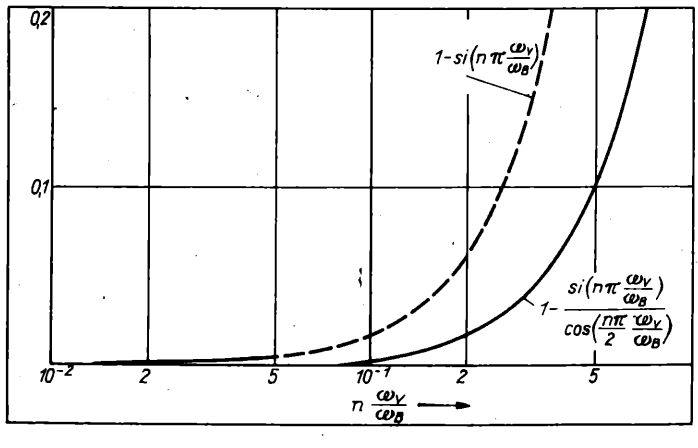


Bild 3. Phasenempfindliche Gleichrichtung und Kurzzeitintegration über $nT/2$ — Frequenzabhängigkeit des Mittelwertes
a) $n = 1$; b) $n = 2$

$$u_{Gt} = \frac{2}{\pi}\hat{U}_t\left\{\sin 2\omega_B t - \frac{1}{3}[-\sin 2\omega_B t + \sin 4\omega_B t] + \right.$$
$$\left.+\frac{1}{5}[-\sin 4\omega_B t + \sin 6\omega_B t] - + \ldots\right\}. \tag{14}$$

Die Integration über $nT/2$ mit $n = 1, 2, 3, \ldots$ ergibt Null, weil das Spektrum von u_{Gt} nur geradzahlige Oberwellen von ω_B enthält, so daß die Terme in (14) bei der Integration einzeln zu Null werden. Der Mittelwert Null des um $\pi/2$ gegen das Referenzsignal verschobenen Störsignales am Ausgang des PG kann durch ideale Kurzzeit-

Bild 4. Normierter Frequenzgang des Betragsmeßfehlers bei synchronisierter Kurzzeitintegration



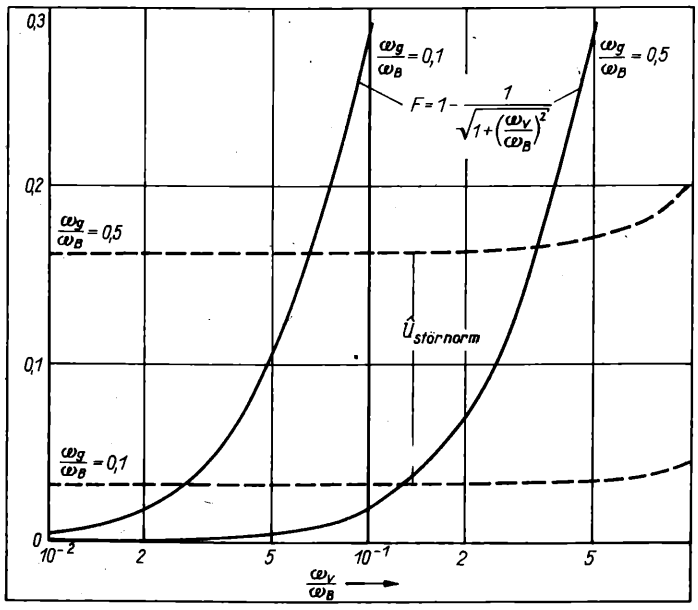


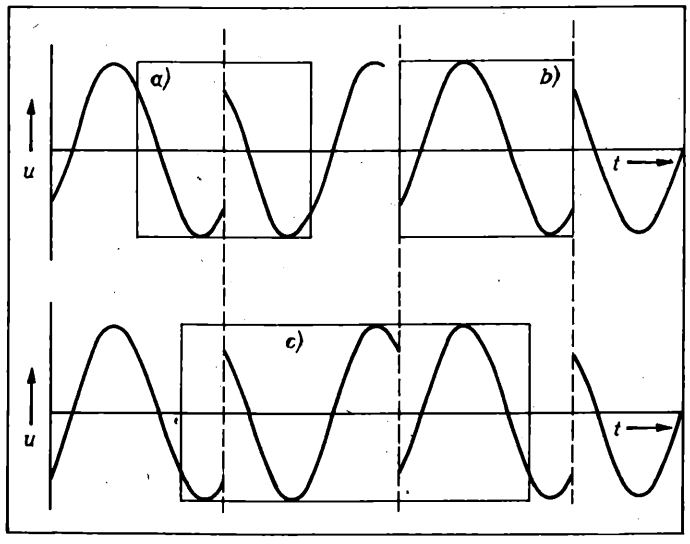
Bild 5. Frequenzgang des Amplitudenmeßfehlers und der Störspannung bei Tiefpaßfilterung

integration mit der hier diskutierten Anordnung bereits nach endlicher Meßzeit bestimmt werden. Dies ist ein prinzipieller Vorteil gegenüber der Tiefpaßfilterung. Über einen TP 1.0. gefiltert wäre das Ausgangssignal

$$u_{At} = \frac{2\hat{U}_1}{\pi}\left\{\frac{\frac{4}{3}\sin\left[2\omega_B t - \varphi(2\omega_B)\right]}{\sqrt{1+\left(\frac{2\omega_B}{\omega_g}\right)^2}} - \frac{\frac{8}{15}\sin\left[4\omega_B t - \varphi(4\omega_B)\right]}{\sqrt{1+\left(\frac{4\omega_B}{\omega_g}\right)^2}} + - \ldots\right\}. \tag{15}$$

Das Ausgangssignal nach Tiefpaßfilterung weist also im Gegensatz zur Kurzzeitintegration eine Restwelligkeit auf, die als zufälliger Fehler die Messung unsicher macht. Dieser Fehler läßt sich nur durch Verringerung der Grenzfrequenz ω_g oder Erhöhung der Filterordnung verkleinern, was Verringerung der Grenzfrequenz des Gesamtgerätes bzw. erhöhten Aufwand bedeutet.

Bild 6. Phasenempfindlich gleichgerichtetes Signal mit doppelter Frequenz der Taktgrundschwingung
a) Integration über eine halbe Taktperiode — Lage des Fensters nicht synchron; b) Integration über eine halbe Taktperiode — Lage des Fensters taktsynchron; c) Integration über eine ganze Taktperiode — Lage des Fensters nicht synchron



4. 50-Hz-Netzstörspannungen

Die Betriebsfrequenz des hier beispielhaft betrachteten induktiven Strömungsmessers wird durch Halbieren der Netzfrequenz gewonnen, so daß 50-Hz-Netzstörspannungen mit genau der doppelten Betriebsfrequenz, aber mit zufälliger Phasenlage auftreten:

$$u_n = \hat{U}_n \cos(2\omega_B t + \varphi). \tag{16}$$

Mit dem Referenzsignal multipliziert ergibt sich am PG-Ausgang

$$u_{Gn} = \frac{2}{\pi}\hat{U}_n\left\{\cos(\omega_B t + \varphi) + \cos(3\omega_B t + \varphi) + - \frac{1}{3}\left[\cos(\omega_B t - \varphi) + \cos(5\omega_B t + \varphi)\right] + + \frac{1}{5}\left[\cos(3\omega_B t - \varphi) + \cos(7\omega_B t + \varphi)\right] - + \ldots\right\}. \tag{17}$$

Das Signal u_{Gn} enthält wie u_{Gt} keinen Gleichanteil, im Gegensatz dazu jedoch nur ungeradzahlige Harmonische von ω_B. Dadurch werden die Kosinusterme in (16) bei Integration über eine halbe Periode der Betriebsfrequenz nicht einzeln zu Null, sondern lediglich in der Summe und dies auch nur, sofern das Integrationsintervall mit einem Vorzeichenwechsel der Rechteck-Referenzspannung beginnt und endet. Dies ist am anschaulichsten an den Zeitverläufen (Bild 6) zu erkennen.

Für maximale Grenzfrequenz des Meßsystems (Anzahl der Halbperioden $n = 1$) ist also außer der Synchronisation der Integrationsdauer (Meßzeit) die Synchronisation der Lage (Phasensynchronisation) des Meßfensters mit dem Referenztakt erforderlich. Bei geringeren Ansprüchen an die Grenzfrequenz kann durch die Wahl von $n = 2, 4, 6, \ldots$ auf die Phasensynchronisation verzichtet werden.

Eine Filterung mit TP 1.0. würde wieder eine Restwelligkeit aufweisen, die sich in einer (15) äquivalenten Form notieren läßt.

5. Rauschen

Das Rauschen des induktiven Strömungsmessers entstammt verschiedenen Quellen, wobei das Dissoziationsrauschen, das Elektrodenkontaktrauschen und das Verstärkerrauschen als wesentlichste Bestandteile zu nennen sind. Im Verstärkerkanal erfolgt eine Bandbegrenzung. Dennoch reicht hier zur Abschätzung der Rauschunterdrückungseigenschaften des Systems die Annahme von weißem Rauschen als entartetem Gaußprozeß, der statistisch unabhängig vom Rechteck-Referenzsignal ist, aus.

Nach [3] ist damit auch das Rauschen am PG-Ausgang (Multiplikatorrauschen) weiß (spektrale Leistungsdichte $S(f) = S_0 = \text{konst.}$), und für das Restrauschen nach idealer Kurzzeitintegration erhält man

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S(f)\,\mathrm{si}^2(f\pi nT/2)\,\mathrm{d}f = \frac{S_0}{nT/2}, \qquad T = \frac{2\pi}{\omega_B}$$

$$\sigma^2 = S_0\frac{\omega_B}{n\pi}, \tag{18}$$

dagegen nach Filterung mit TP 1.0.

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty}\frac{S(f)}{1+\left(\frac{f}{f_g}\right)^2}\,\mathrm{d}f = S_0 f_g \pi,$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{2}\omega_g S_0. \tag{19}$$

Zum Vergleich beider Mittelungsverfahren seien wegen der näherungsweise gleichen Frequenzgänge des Amplitudenmeßfehlers (siehe Bilder 4 und 5) herangezogen:

1. Kurzzeitintegrator mit $n = 2$

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi}S_0\omega_B = S_0 f_B$$

2. Tiefpaßfilter 1. Ordnung mit $\frac{\omega_g}{\omega_B} = 1/2$

$$\sigma^2 = \frac{1}{4}S_0\omega_B = \frac{\pi}{2}S_0 f_B.$$

Hiermit wird deutlich, daß bei Berücksichtigung der eingeführten Näherungen Kurzzeitintegration und TP 1.0. etwa gleiche Rauschunterdrückungseigenschaften aufweisen.

Zusammenfassung

Zur AD-Umsetzung phasenempfindlich gleichgerichteter Signale lassen sich vorteilhaft integrierende ADU einsetzen, wenn deren Meßzeit (= Integrationszeit) mit dem Takt des PG synchronisierbar ist und sie positive und negative Eingangsspannungen verarbeiten können. Solche ADU werden als monolithisch integrierte Schaltkreise gefertigt (z. B. System C 500) und führen zusammen mit integrierten PLL-Schaltkreisen zur Taktsynchronisation zu kostengünstigen und übersichtlichen Signalverarbeitungsstrukturen.

Periodische Störsignale, die mit dem Takt des PG korreliert aber um 90° phasenverschoben sind (hier: transformatorische Störspannung) oder deren Spektrum nur ganzzahlige Vielfache der Taktgrundschwingung enthält (hier: Netzstörspannung), können mit der synchronisierten Kurzzeitintegration schon in endlicher Meßzeit unterdrückt werden, wogegen bei Tiefpaßfilterung prinzipiell Restwelligkeiten bleiben, die nur auf Kosten der Grenzfrequenz des Meßgerätes reduziert werden können.

Bezüglich der Unterdrückung breitbandiger, nicht korrelierter Störungen (Rauschen) erweisen sich dagegen Tiefpaßfilterung und Kurzzeitintegration bei gleicher Grenzfrequenz als nahezu gleichwertig.

Bei der Tiefpaßfilterung verursachen Modulationsprodukte von Nutzsignal und höherfrequenten Anteilen des Referenzsignales Störspannungen, die sich ähnlich wie die zuvor genannten Restwelligkeiten wie zufällige Fehler verhalten, da sie eine Unsicherheit der Messung bewirken. Diese treten bereits bei der Nutzsignalfrequenz Null auf und lassen sich durch Erniedrigen der Tiefpaßgrenzfrequenz verringern (mit der genannten Auswirkung auf die Grenzfrequenz des Gerätes). Zusätzlich ist zu fordern, daß das Nutzsignal bandbegrenzt ist, da eine Überlappung der Seitenbänder im Nutzspannungsspektrum zu einem steilen Anwachsen der Störspannung führt.

Die synchronisierte Kurzzeitintegration liefert periodisch Mittelwerte, in die die spektralen Nutzsignalkomponenten gewichtet eingehen. Die Grenzfrequenz des Gerätes wird abhängig von der Anzahl der in die Integration einbezogenen Halbperioden der Taktfrequenz dadurch bestimmt, daß die Wichtung einen zulässigen Fehler überschreitet. Das Nutzsignal muß zusätzlich bandbegrenzt sein, so daß sich die höchsten Nutzsignalfrequenzen entsprechend der Meßwiederholrate (Abtasttheorem) reproduzieren lassen (schärfere Forderung als bei der Tiefpaßfilterung mit kontinuierlich vorliegendem Ausgangssignal). Ist dies gegeben, so kann mit der synchronisierten Kurzzeitintegration bei gleichen Fehlern eine etwa 5- bis 10mal höhere Meßgerätegrenzfrequenz als bei der Tiefpaßfilterung erreicht werden.

Literatur

[1] SCHOMMARTZ, G.: Induktive Strömungsmessung. Berlin: VEB Verlag Technik 1974.
[2] SCHLÜTER, H.; SCHOMMARTZ, G.: Praktikumsversuch „Induktiver Strömungsmesser". msr, Berlin 26 (1983) 3; S. 132—134.
[3] LANGE, F. H.; MÜLLER, W.: Korrelationsanalyse. In: Taschenbuch Elektrotechnik. Band 2. Berlin: VEB Verlag Technik 1977.
[4] SCHLÜTER, H.: Anordnung zur Analog-Digital-Wandlung phasenempfindlich gleichgerichteter Signale. WP G01F/Az. 3067260.
[5] BRONSTEIN-SEMENDJAJEW: Taschenbuch der Mathematik. Leipzig: BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1960.

msr 8821

G. Urner

Korrelationsdurchflußmessung, ein Meßverfahren für schwierige Fluide

0. Einleitung

Die Erwartungen in neue moderne Durchflußmeßverfahren sind insgesamt hoch, da viele Anwender von Durchflußmeßtechnik ungenügend gelöste oder ungelöste Probleme haben. Dank der Entwicklung der Mikroelektronik konnten die Gebrauchseigenschaften bekannter Verfahren verbessert werden, und neue moderne Verfahren hielten ihren Einzug in die industrielle Betriebsmeßtechnik. Dazu gehört auch das Korrelationsdurchflußmeßverfahren. Dieses Verfahren sollte jedoch zunächst schwierigen Fluiden, wie Mehrstoff- und Mehrphasengemischen sowie stark verschmutzten Flüssigkeiten, vorbehalten bleiben, deren Messung zu den außerordentlich unbefriedigt gelösten Problemen gerechnet werden muß. Es wäre völlig verkehrt, im Korrelationsverfahren ein universelles Durchflußmeßverfahren zu sehen, das im großen Maßstab andere Verfahren ablösen wird. In letzter Zeit wurden beispielsweise gute Ergebnisse bei der Messung von fluidisiertem Kohlenstaub bekannt [6]. Durch die hohen Ansprüche, die heute an Durchflußmeßverfahren insgesamt gestellt werden (immerhin geht es stets um Stoff- und Energiebilanzen und die sichere Führung von Prozessen), benötigt man für die Korrelationsdurchflußmessung einen leistungsfähigen Industriekorrelator und der Spezifik des Fluids angepaßte Sensoren. Nur in dieser Einheit ergibt sich ein funktionsfähiges Durchflußmeßverfahren.

1. Korrelationsdurchflußmessung, ein Laufzeitverfahren

Die Korrelationsdurchflußmeßtechnik basiert auf dem Prinzip der Laufzeitmessung durch Markierung und der Nutzung der Möglichkeiten der Mikrorechentechnik, d. h. der logischen Verknüpfung von auf 1 bit quantisierten Meßsignalen. Es werden dabei natürliche und künstliche Markierungen genutzt. Natürliche Markierungen sind verschiedene Inhomogenitäten im strömenden Fluid; künstliche Markierungen können im Fluid stochastisch erzeugt werden. Die Laufzeit wird bei Korrelationsverfahren nicht, wie bei den klassischen Impf- oder Tracer-Verfahren, mit einer einzelnen Markierung bestimmt, sondern als Mittelwert einer Vielzahl von Markierungen. Dabei ist der einfachste Fall die Bewegung eines „eingefrorenen Musters", wie im Bild 1 dargestellt. Zwei optische Sensoren messen fortlaufend die schwankende Transparenz. Wird das Signal vom ersten Sensor $x(t)$ stufenlos verzögert und werden beide Signale $y(t)$ und $x(t - \tau)$ auf die entsprechenden Eingänge eines Oszillografen gegeben, dann bewegt sich der Elektronenstrahl bei einer Verzögerung τ, die der Laufzeit entspricht, um so besser auf einer Geraden, je größer die Übereinstimmung beider Signale ist. Die Korrelationsfunktion R_{xy} ist ein Maß für den linearen Zusammenhang von zwei Größen $x(t)$ und $y(t)$ in Abhängigkeit von der

Dr.-Ing. GERD URNER (48) studierte von 1958 bis 1964 Strömungstechnik an der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden. Seit 1964 Assistent und Oberassistent am WB Meß- und Automatisierungstechnik thermischer Anlagen der Sektion Energieumwandlung der TU Dresden. 1979 Promotion A auf dem Gebiet der Durchflußmeßtechnik. Vorsitzender des FUA „Durchflußmeßtechnik" in der WGMA.

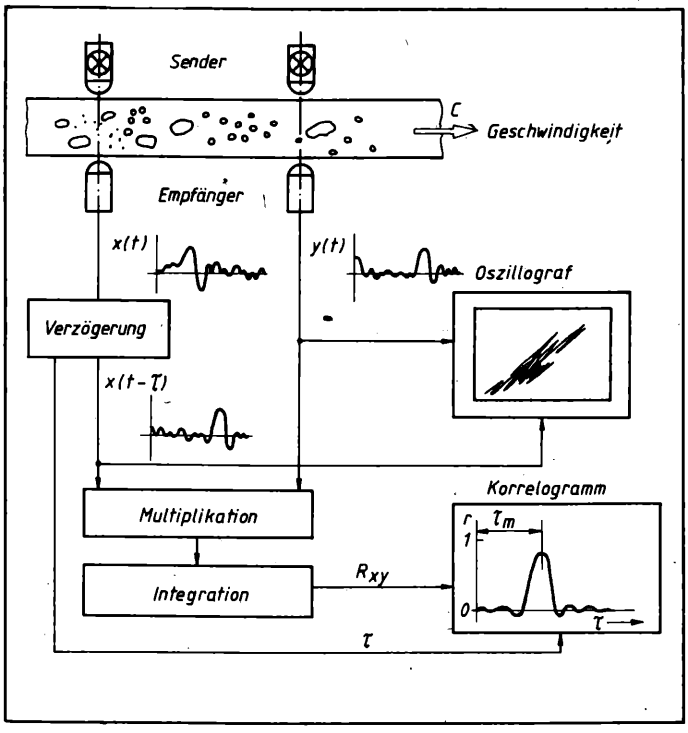


Bild 1. Darstellung des Meßprinzips zur Korrelation

Zeitdifferenz zwischen den Meßstellen, an denen $x(t)$ und $y(t)$ gemessen werden

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t - \tau)\, y(t)\, dt\,. \tag{1}$$

In analoger Ausführung benötigt man zur Aufnahme eines Korrelogramms ein Verzögerungsglied, einen Multiplizierer, einen Integrierer und einen R_{xy},τ-Schreiber (Bild 1).

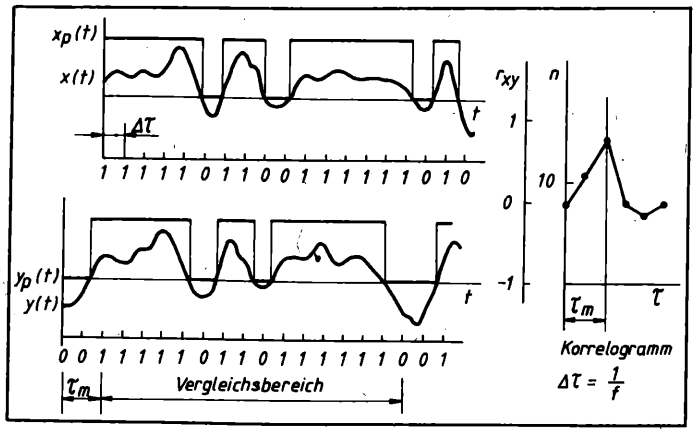
Da bereits viele Informationen in den Nulldurchgängen der Wechselsignale $x(t)$ und $y(t)$ liegen, kann mit der Polaritätskorrelationsfunktion gearbeitet werden. Diese ist um den Arcus-Sinus verzerrt, hat aber an den gleichen Stellen Extremwerte und Nullstellen wie die exakte Korrelationsfunktion

$$R_{pxy}(j) = \frac{1}{N} \sum_0^N \operatorname{sgn} x(k - j) \operatorname{sgn} y(k)\,. \tag{2}$$

2. Algorithmus eines Polaritätsdurchflußkorrelators

Das Polaritätskorrelationsverfahren nutzt einen verblüffend einfachen Algorithmus (Bild 2). Das analoge Signal der Sensoren, von dem nur der Wechselanteil von Interesse ist, wird durch einen Komparator auf 1 bit quantisiert und mit einer gewählten Taktfrequenz $f = 1/\Delta T$ unter Berücksichtigung des Abtasttheorems abgetastet. Über eine Äquivalenzprüfung aller logischen Werte sgn x und sgn y

Bild 2. Skizze zum Algorithmus des Polaritätskorrelators



in einem vorgegebenen Vergleichsbereich, wobei der Speicherinhalt in $\Delta\tau$-Schritten verschoben wird, erhält man an einer Stelle ein Maximum an Übereinstimmungen. Im gewählten Beispiel (Bild 2) befindet sich dieses Maximum nach dem zweiten Schritt. Da bei einer nichtkorrelierten Bitfolge der Korrelationskoeffizient r_{xy} bei der Hälfte der maximal möglichen Übereinstimmungen null und bei der maximal möglichen Anzahl eins werden soll, ist die relative Anzahl der Übereinstimmungen n/n_{max} nicht gleich dem Korrelationskoeffizienten. Im Beispiel ergeben 14 von 16 möglichen Übereinstimmungen einen Korrelationskoeffizienten $r_{xy} = 0{,}75$. Um die Streuungen des Ergebnisses klein zu halten, wird der Vergleich mit einer um ein Vielfaches größeren Anzahl von Werten vorgenommen. Dieser Algorithmus ist mikrorechnerfreundlich.

Polaritätskorrelatoren können mit festverdrahteter Logik oder mit einem Mikrorechner realisiert werden [1] und [2]. Dem Mikrorechnerkorrelator sollte dabei der Vorzug gegeben werden, da dieser über die Berechnung der Verzögerungszeit hinaus weitere Funktionen übernehmen kann, die wesentlich die Gebrauchseigenschaften als Durchflußmesser verbessern.

Durch die Vorwahl eines Meßfensters kann ein sinnvoller Meßbereich vorgegeben werden und die Sicherheit durch den Ausschluß von sehr kurzen Verzögerungszeiten (beispielsweise durch Körperschall bei Ultraschallsensoren) verbessert werden [5]. Ein Mikrorechnerkorrelator kann gleichzeitig alle Aufgaben eines Flowcomputers übertragen bekommen. Die Dynamik der bekannten Polaritätskorrelatoren ist aufgrund der hohen Anzahl zu vergleichender Werte mit Meßzeiten im Sekundenbereich im Vergleich zu anderen Durchflußmeßgeräten nicht sonderlich gut, aber für viele technische Prozesse ausreichend. Der Algorithmus der Closed-loop-Korrelators, bei dem die Verzögerung auf der Stelle des Maximums der Korrelationsfunktion gehalten wird, hat Dynamikvorteile. Dieser Algorithmus, bei dem ein Signal differenziert wird, um die Differenz der quadratischen Abweichungen aus Modellverzögerungszeit und Laufzeit der Strömung minimal werden zu lassen, hat den Vorteil, daß nicht das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion sondern ihre Nullstelle bestimmt wird. Das birgt regelungstechnische Vorteile in sich [2] und [8].

3. Anforderungen an die Sensoren

Für die Korrelationsdurchflußmessung kommt eine Vielzahl von Sensoren in Betracht [5] und [3]. Sie haben die Aufgabe, fluidspezifische Inhomogenitäten möglichst gut zu detektieren. Dazu sind Kenntnisse darüber erforderlich, welche Inhomogenitäten wie gut vom ersten zum zweiten Sensor erhalten bleiben. Die Sensoren detektieren stets das fluidspezifische Merkmal mit der größten Wirkung auf den Sensor. So können Sensoren beispielsweise ihre maximale Empfindlichkeit im Bereich der Rohrwand haben, wo die langsamen Teilchen strömen. Die Sensoren müssen auch einen eindeutig definierten Sensorabstand aufweisen. Die vom Sensor erfaßten Informationen liegen in der Regel in einem Frequenzband zwischen 2 Hz und 500 Hz. Dabei müssen die Sensoren in der Lage sein, Signale in diesem Frequenzband zu detektieren. Im Interesse kleiner Fehler und Meßzeiten sollen die Signale möglichst hochfrequent sein. Beide Meßketten vom Sensor bis zum Eingang des Korrelators müssen darüber hinaus das gleiche Übertragungsverhalten haben. Unterschiedliche Bandbreiten und Phasenungleichheit führen zu Fehlern. Schließlich ist zu klären, ob ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Störung und der mittleren Fluidgeschwindigkeit besteht. Man erkennt, daß die Auswahl der Sensoren keine leichte Aufgabe ist. Die Korrelationsdurchflußmeßtechnik wird gerade deshalb nur zögernd eingeführt, weil diese Kenntnisse fehlen und vom Meßgerätehersteller nur wenige komplette Lösungen angeboten werden. Erleichternd sei genannt, daß der Signal-Rauschabstand von untergeordneter Bedeutung ist und damit hohe Signalverstärkungen möglich sind. Mit optischen Sensoren liegen bereits gute Erfahrungen in verunreinigten Fluiden, z. B. in der Abwassermessung, vor. Die kapazitiven Sensorsysteme sind für nichtleitende Gas-Feststoffströmungen (z. B. fluidisierter Kohlenstaub) geeignet [6]. Mit Ultraschallsensoren sind in verunreinigten Flüssigkeiten gute Ergebnisse erzielt worden [4]. Ladungs-

empfindliche Sensoren werden für Gas-Feststoffströmungen empfohlen. Thermoelemente zur Detektion von Temperaturballen haben in der Regel eine zu niedrige Grenzfrequenz [1]. Bei der Entwicklung und Untersuchung fluidspezifischer Sensorsysteme können entscheidende Fortschritte nur in enger Zusammenarbeit mit Anwendern erzielt werden, da für die Experimente mit schwierigen Fluiden aufwendige und häufig hohe Sicherheitsanforderungen erfüllende Versuchsstrecken erforderlich sind.

Die Problematik des Einflusses von Inhomogenität und Sensor auf das Signal soll an einem optischen Sensorsystem verdeutlicht werden (Bild 3). Teilchen einer zweiten Fluidkomponente mit unterschiedlicher Größe und Transparenz bewegen sich durch den optisch wirksamen Bereich der Sensoranordnung mit der Längenabmessung a. Die räumliche Integration der Störungen durch den Aufnehmer ergibt eine Tiefpaßwirkung. Die Grenzfrequenz ist proportional der Geschwindigkeit c und umgekehrt proportional der Sensorabmessung a. Sensoren mit schmalen Empfindlichkeitszonen zu fertigen, ist nicht einfach, da viele Sensoren (z. B. Ultraschallschwinger) nicht geringe Mindestabmessungen haben. Kleine Teilchen mit Längenabmessungen $l \ll a$ bewirken eine geringe Modulation. Große Inhomogenitäten mit $l > a$ ergeben nur ein niederfrequentes Signal. Die aus beiden Einflüssen resultierende Bandbreite liegt zwischen 2 Hz und 500 Hz. Die Abtastfrequenz sollte etwa dem 10fachen Wert der oberen Signalfrequenz entsprechen. Eine hohe Abtastfrequenz ist auch durch die geforderte Auflösung bedingt, da die üblichen Sensorabstände L für einen noch ausreichenden Korrelationskoeffizienten in der Größenordnung $1 < L/D < 3$ liegen und bei kleinen Nenndurchmessern der Rohrleitung und großen Geschwindigkeiten sehr kleine Verzögerungszeiten auftreten [3]. Um die Signalqualität und damit die Zuverlässigkeit zu verbessern, kommen Mehrsensoranordnungen in paralleler und serieller Form zur Anwendung [9]. Eine andere Möglichkeit besteht in der Dreisensoranordnung, bei der jeweils die Differenz zwischen dem ersten und zweiten sowie dem zweiten und dritten Sensor gebildet wird [8].

4. Korrekturfaktoren und Fehler

Bei der Korrelationsdurchflußmessung wird, wie bei allen Laufzeitverfahren, der Volumenstrom als Produkt von Fläche A und Sensorabstand L dividiert durch die Laufzeit τ_m bestimmt. Diese Definition ergibt stets nur einen theoretischen Volumenstrom $\dot{V}_{theo}$, der mit einem Korrekturfaktor zu multiplizieren ist

$$\dot{V}_{theo} = \frac{A \cdot L}{\tau_m}, \tag{3}$$

$$\dot{V} = K_{ges} \cdot \dot{V}_{theo}. \tag{4}$$

Der Gesamtkorrekturfaktor K_{ges} ist das Produkt aus den Anteilen Profilfaktor K_1, Sensorfaktor K_2 und Komponentenanteilfaktor K_3. Das Fluid bewegt sich nicht als „eingefrorenes Muster". Aufgrund der Grenzschicht ergibt sich immer eine unterschiedliche Geschwindigkeit zwischen Wandnähe und Kanalmitte, die durch den Profilfaktor K_1 erfaßt wird. Der Sensorfaktor K_2 berücksichtigt, daß der Sensor nur einen Ausschnitt des Strömungskanals überstreicht und das zufällige Merkmal in der Strömung mit der größten Wirkung auf das gewählte Sensorprinzip detektiert. Der Komponentenanteilfaktor K_3 berücksichtigt bei Zweikomponenten- und Zweiphasenströmungen den Phasenanteil und die unterschiedliche Phasengeschwindigkeit. Wird beispielsweise ein kleiner Gasvolumenanteil $\alpha = A_{Gas}/A_{Flüss.}$ als Markierung zur Messung des Volumenstromes der Flüssigkeitsphase genutzt, dann ergibt sich für den Volumenstrom der Flüssigkeitsphase

$$\dot{V}_{Flüss.} = A\bar{c}_{Gas}\left[(1-\alpha)\frac{\bar{c}_{Flüss.}}{\bar{c}_{Gas}}\right]. \tag{5}$$

Der Komponentenanteilfaktor K_3 ist gleich dem Klammerausdruck. Phasenanteil und Schlupf müssen dabei bekannt sein. Es wird als selbstverständlich vorausgesetzt, daß beide Kanäle gleiches Übertragungsverhalten haben und dafür kein weiterer Korrekturwert notwendig ist. Der Fehler des Volumenstromes setzt sich aus dem Fehler der geometrischen Größen Fläche und Sensorabstand, dem Fehler der Laufzeitbestimmung und dem Fehler, mit dem der Korrekturfaktor angegeben werden kann, zusammen. Der Laufzeitfehler hat einen festen Anteil, bedingt durch die begrenzte Auflösung bei der gewählten Abtastfrequenz, und einen Anteil infolge der Streuung, da die Meßzeit immer endlich und die Bandbreite stets begrenzt ist. Eine Vergrößerung der Bandbreite, der Meßzeit und der Ähnlichkeit beider Signale verringert die Streuung der Laufzeit. Daraus ergeben sich Forderungen nach hoher Abtastfrequenz, kleinen Sensorabmessungen und kurzem Sensorabstand.

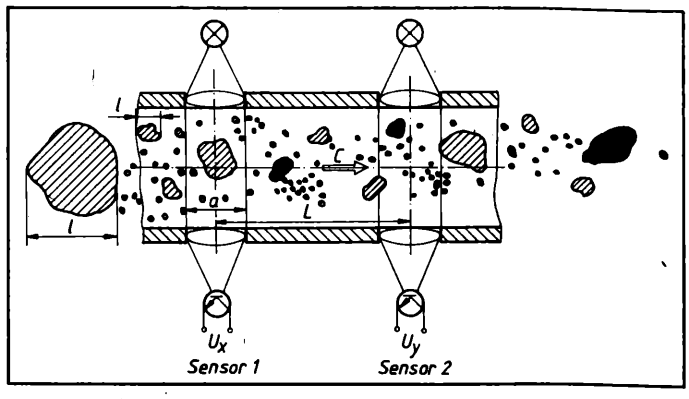


Bild 3. Einfluß von Inhomogenitäts- und Sensorabmessungen auf das Signal am Beispiel eines optischen Sensorsystems

5. Meßergebnisse in Rohrströmungen

Im Wissenschaftsbereich Meß- und Automatisierungstechnik der Sektion Energieumwandlung an der TU Dresden wurden gemeinsam mit dem ZfK Rossendorf und verschiedenen Anwendern Sensoren für die Korrelationsdurchflußmessung ausgewählter Fluide untersucht. Zunächst wurden Experimente mit einer optischen Sensorstrecke und den Fluiden Leitungswasser, Wasser mit Feststoffteilchen unterschiedlicher Korngrößen und Wasser-Öl-Gemischen mit unterschiedlichen Komponentenanteilen durchgeführt. Als Meßstrecke wurde ein Glasrohr benutzt. In einem das Rohr umschließenden Kunststoffblock waren Sender (Fotodiode VQ 106) und Empfänger (Fototransistor SP 201) über entsprechende Bohrungen eingedrückt. Die Diagramme im Bild 4 und im Bild 5 zeigen einige wenige Meßergebnisse, die aber auch für Messungen mit anderen Aufnehmern typisch sind. Zwischen dem mit dem Korrelator ermittelten theoretischen Volumenstrom $\dot{V}_{theo}$ und dem Volumenstrom des Vergleichsnormals $\dot{V}_{Normal}$ besteht in einem großen Meßbereich ein linearer Zusammenhang. Der Gesamtkorrekturfaktor entspricht mit $K_{ges} = 0{,}845$ Werten, die auch mit Ultraschallsensoren in verschmutzten Fluiden gemessen wurden [4]. Der Korrelationskoeffizient nimmt mit wachsendem Sensorabstand L/D erwartungsgemäß ab. Die Standardabweichung zeigt, daß bei niedriger Abtastfrequenz erhebliche Meßzeiten erforderlich sind. In den Diagrammen sind zum Vergleich Werte mit Thermoelementen als Aufnehmer zur Detektion künstlich erzeugter Temperaturballen eingetragen. Gute experimentelle Ergebnisse wurden auch bei der Messung von Staubtransportvorgängen mit Ultraschallaufnehmern erzielt.

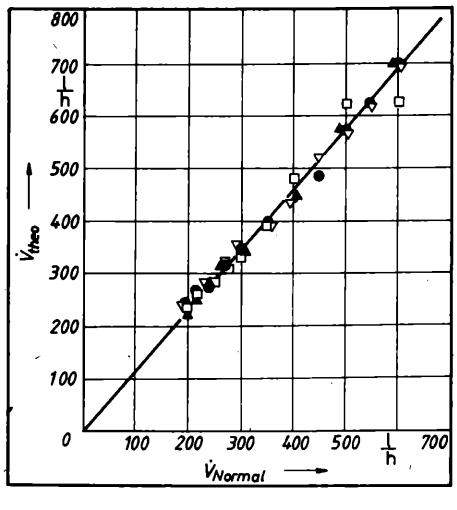


Bild 4. Volumenstrommessung mit MC-80-Korrelator (Fluid: Wasser mit unterschiedlichen Feststoffanteilen)
Feststoffanteile:
□ 0% (Wasser);
● 0,01%; ▲ 0,1%;
▽ 1,0%
D = 15 mm;
L = 10 mm;
K_{ges} = 0,845

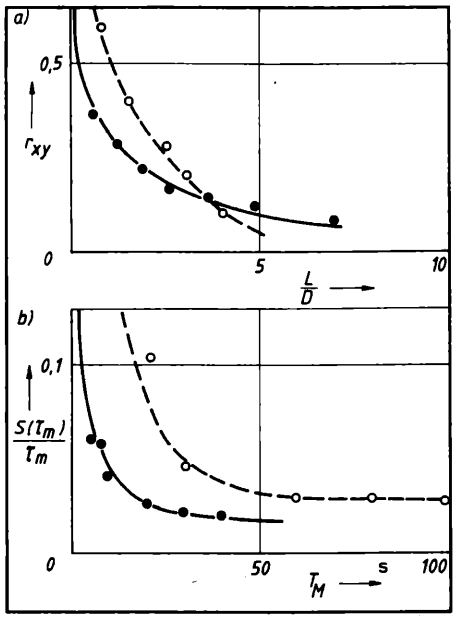


Bild 5. Korrelationskoeffizient r_{xy} in Abhängigkeit vom relativen Sensorabstand L/D(a) und Standardabweichung der Laufzeit $\frac{S(\tau_m)}{\tau_m}$ in Abhängigkeit der Meßzeit T_M(b)
a) ● Wasser mit 0,1 % Feststoffanteil, optischer Sensor; ○ Wasser mit künstlich erzeugten Temperaturballen; Sensor Thermoelement
b) ● $L/D = 0{,}75$; ○ $L/D = 1{,}5$

6. Durchflußkorrelator mit Mikrorechner MC 80

Aufbauend auf den Erfahrungen, die im ZfK Rossendorf [1] mit einem Mikrorechner-Korrelator gesammelt werden konnten, wurde eine Lösung auf der Grundlage des Mikrorechners MC 80 erarbeitet [7]. Der MC 80 ist in großer Stückzahl vorhanden und kann als Korrelator programmiert werden.

Die gerätetechnische Lösung besteht aus einer zweikanaligen Signalaufbereitungseinheit mit verschiedenen Abtastfrequenzen, Verstärker und Bandfiltern. Die Meßwerte werden zunächst kompariert, mit dem gewählten Takt in einen 8-bit-Speicher eingeschrieben und danach byteweise an den MC 80 übergeben. Die Meßzeit ist frei wählbar. Zunächst wird eine Grobrechnung durchgeführt. Die Äquivalenzbildung erfolgt dabei mit byteweise versetzten Werten. Die Feinrechnung beginnt 1 byte vor dem Maximum durch bitweises Verschieben. Die Grobrechnung erfolgt in mehreren Durchläufen, so daß die zeitliche Entwicklung des Korrelogramms über die Grafik verfolgt werden kann. Das Programmsystem besteht aus einem in BASIC geschriebenen Rahmenprogramm und dem eigentlichen Korrelationsunterprogramm in Z-80-Assemblersprache. Das Programm ist dialogorientiert aufgebaut. Mit Hilfe des BASIC-Rahmenprogramms erfolgt die Weiterverarbeitung der Meßwerte. Der MC-80-Korrelator hat sich als nutzerfreundliche Lösung in der Forschung zur Erprobung des Korrelationsdurchflußprinzips und verschiedener Sensoren für schwierige Fluide erwiesen.

Literatur

[1] Beiermann, N.; Kretschmer, H.; Eichler, R.; Flämig, E.; Kath, U.; Wittke, W.: Messung von Strömungsgeschwindigkeiten und Volumen- bzw. Massestrømen nach einem Laufzeitverfahren. msr, Berlin 27 (1984) 4, S. 155—160.

[2] Kumpfert, L.; Reinhold, M.: Mengenstrom- und Geschwindigkeitsmessung nach der Korrelationsmethode. Lebensmittelindustrie 29 (1982) 9, S. 390—394.

[3] Beck, M. S.: Correlation in instruments: cross correlation flowmeters. I. Phys. E.: Sci. Instrum., Vol. 14 (1981).

[4] Balachandram, W.; Beck, M. S.: Solids-concentration measurement and flow measurement of slurries and sludges using ultrasonic sensor with random data-analysis. Trans. Instr. M. C., Vol. 2; No 4, Oct.—Dec. 1980.

[5] Endress & Hauser; Firmenschrift: Korrelationsmeßtechnik für Eilige.

[6] Endress & Hauser; Firmenschrift: Granucor, Durchflußmessung für Schüttgüter.

[7] Müller, U.: Durchflußkorrelator mit Mikrorechner MC-80. Diplomarbeit Nr. 2074, TU Dresden, Sektion 12, WB MAT.

[8] Koppermann, C.: Geschwindigkeits- und Durchflußmessung in einphasigen Strömungen mit Kreuzkorrelationsverfahren. Fortschritt-Bericht, VDI-Z, Reihe 8, Nr. 63, Düsseldorf, 1984.

[9] BBC, Kent Industrial Measurements Limited; Firmenschrift: Accurate two-phase and multi-phase flow measurement with the Kent microprocessor-based Multichannel Correlation Flowmeter. msr 8820

H. Gehlhaar

Durchflußmessungen nach Differenzdruckverfahren

0. Einleitung

Marktanalysen und Statistiken aus den Einsatzgebieten von Durchflußmeßtechnik zeigen einmal das Vordringen moderner elektronischer Meßverfahren und belegen zum anderen mit ihrem Anteil von etwa 40 % die fortbestehende Dominanz der Durchflußmessung nach Differenzdruckverfahren [1] und [2].

Unter den Differenzdruckverfahren überwiegen die Wirkdruckverfahren so stark, daß sie häufig allein für diese Kategorie aufgeführt werden. Nach einer kurzen Übersicht zu Durchflußmeßverfahren mittels Differenzdruckmessung wird ein DDR-Standard zur Wirkdruckdurchflußmessung vorgestellt, der als TGL 43549 ab 1. Januar 1988 für Neuentwicklungen und Rekonstruktionen verbindlich ist.

1. Einteilung nach Art des Differenzdruckes

1.1. Staudruck

Aus der Übersicht der Tafel 1 ist zu entnehmen, daß man bei der Durchflußbestimmung über die Meßgröße Differenzdruck zwei Verfahren voneinander unterscheiden muß, die sich aus der Art des für die Strömungsgeschwindigkeit c bzw. für den Volumenstrom $\dot{V}$ charakteristischen Differenzdruckes Δp ergeben. Beim Verfahren I besteht die Absicht, zunächst die Geschwindigkeit des Fluids aus der Größe des dynamischen Druckes entsprechend seiner Definition als $p_{dyn} = \frac{\varrho}{2} c^2$ zu bestimmen. Meßtechnisch läßt sich der dynamische Druck aber nur aus der Differenz von Gesamtdruck p_{ges} und statischem Druck p als Staudruck Δp erfassen. Alle Abweichungen des Meßwertes „Staudruck" von der Meßgröße „dynamischer Druck" sollen in dem Sondenfaktor K_S berücksichtigt werden. In diesen Faktor gehen alle Einflußgrößen, wie Sondenform, Stoffwerte, Strömungsparameter und Einbaubedingungen, ein. Um aus dem gemessenen Differenzdruck auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit $\bar{c}$ schließen zu können, werden praktisch drei Möglichkeiten genutzt (Tafel 1).

ⓐ Der Strömungsquerschnitt A wird schrittweise entlang einer oder zweier Wegkoordinaten (r, φ) oder (x, y) abgetastet und $\bar{c}$ durch Integration bestimmt. Dieses Verfahren der Netzmessung ist für die Betriebsmeßtechnik praktisch ohne Bedeutung.

ⓑ Für diese Variante werden bereits handelsübliche Geräte angeboten. In [2] wird eine Sonde mit einem Abstand von $0{,}119D$ vom Rohrinnendurchmesser D als repräsentativer Ort für $\bar{c}$ mit folgenden Eigenschaften vorgestellt

Dr.-Ing. Heinz Gehlhaar (49) studierte von 1963 bis 1968 Kraft- und Arbeitsmaschinen an der TU Dresden. Anschließend dort Forschungsstudium an der Sektion Energieumwandlung. 1972 Promotion A. Seit 1972 Lektor im WB Meß- und Automatisierungstechnik der Sektion Energieumwandlung der TU Dresden.

Meßbereich: 1:30
Meßfehler: (ohne Δp-Messung) bei $\dot{V}_{min}$ ± 2%
bei $\dot{V}_{max}$ ± 1%.
Die Geräte sind eichfähig und beim Einsatz als Wärmezähler im rechtsgeschäftlichen Verkehr zugelassen. Das ist verständlich und gerechtfertigt, wenn man die Fehlereinflüsse bei der Wärmemessung betrachtet [3].

ⓒ Bei der Verwendung von Integrationssonden befinden sich die Bohrungen an den Sonden an mehreren, z. B. radial versetzten Orten, so daß ein mittlerer Systemdruck (p^*_{ges}) gebildet wird, der der mittleren Strömungsgeschwindigkeit proportional ist [4]. Dieser Systemdruck ist vom Gesamtdruck verschieden und wird deshalb mit einem * gekennzeichnet. Hierfür wird in [2] ein integrierendes Staurohr mit einem Meßfehler von ±1% (ohne Differenzdruckmessung) vorgestellt.
Den Versuch, Integrationssonden zu standardisieren, erkennt man am Fertigungsprogramm von ANNUBAR-Durchflußsonden [5]. Der Standard bleibt für die Fertigung firmenintern und erspart den Anwendern nicht das Kalibrieren kompletter Durchflußmeßeinrichtungen. Die Wirkung eines Standards für den Bereich der Wasserwirtschaft der Ukraine erreicht eine Empfehlung zur Berechnung und Montage von Integrationssonden [6]. Hierin wird bei Verwendung von Integrationskreuzen ohne Kalibrierung für den Durchfluß eine Unsicherheit von ±3% abgeschätzt. Das entspricht etwa dem Grundfehler von (1,2 bis 2,4)% von ANNUBAR-Sonden für Nennweiten (650 bis 4500) mm [5].

1.2. Wirkdruck

Beim Verfahren II wird in einem Rohr ein Wirkdruckgeber angeordnet, der durch seinen geringeren freien Querschnitt zur Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führt. Zwischen den Meßebenen ① vor und ② nach dem Wirkdruckgeber stellt sich eine Differenz der statischen Drücke $\Delta p = p_1 - p_2$ ein. Dieser Wirkdruck ist proportional dem Volumenstrom $\dot{V}$. Das Verfahren ist seit mehr als 100 Jahren als Betriebsmeßverfahren bekannt. Durch die Einschränkung auf genormte Wirkdruckgeber (Blende, Düse, Venturi-Düse) und Festlegungen über Ort und Form der Druckentnahmeöffnungen wurden umfangreiche Untersuchungen der Einflußgrößen möglich. Folgende Vorteile lassen sich für das standardisierte Wirkdruckverfahren erkennen:

— bekannter, umfangreich erforschter physikalischer Effekt
— einsetzbar für Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe
— kein Kalibrieren bei normgerechter Ausführung erforderlich
— Angaben zu Meßunsicherheiten sind möglich
— großer Meßbereich (Nenndurchmesser D = 50 ... 1000 mm)
— einfache Fertigung.

Einschränkend wirken sich folgende Forderungen und Bedingungen aus:

— vollständig ausgefüllte stationäre Rohrströmung ohne Pulsation
— einphasiges Fluid
— Unterschallgeschwindigkeit mit einer Reynolds-Zahl $Re > 3150$
— Einhaltung von Fertigungstoleranzen und Einbaubedingungen für Rohre und Wirkdruckgeber.

1.3. Vergleich

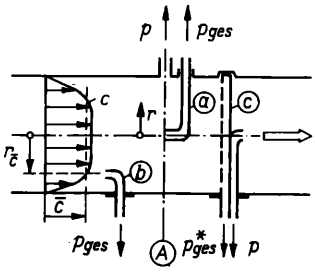
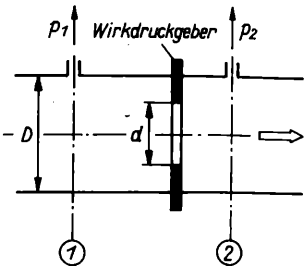
Staudruckverfahren sind besonders dann von Vorteil, wenn geringe Druckverluste gefordert werden. Sie kommen aber auch zur Anwendung, wenn die Einsatzgrenzen der Wirkdruckverfahren überschritten werden, z. B. bei NW > 1000. Die Fehlergrenzen von ±1% sind nur erreichbar, wenn die gesamte Meßeinrichtung im eingebauten Zustand kalibriert wird.

Das Wirkdruckverfahren kann sich auf Basis des neuen Standards durch die geringen möglichen Meßunsicherheiten in naher Zukunft weiter behaupten.

Anmerkung:
Den Differenzdruckverfahren sind auch Stauscheiben-Durchflußmesser mit starren Scheiben und Differenzdruckentnahme zuzuordnen [7].

Tafel 1. Übersicht zur Durchflußbestimmung nach dem Differenzdruckverfahren

Durchflußbestimmung über die Meßgröße Differenzdruck Δp

Verfahren I Messung in einer Ebene Meßgröße: Staudruck $\Delta p = p_{ges} - p$	Verfahren II Messung in zwei Ebenen Meßgröße: Wirkdruck $\Delta p = p_1 - p_2$
	
$c = \sqrt{\frac{2}{\varrho} p_{dyn}} = K_S \sqrt{\frac{2}{\varrho} \Delta p}$ $\dot{V} = A \cdot \bar{c}$	$\dot{V} \sim \sqrt{\frac{2}{\varrho_1} \Delta p}$ $\dot{V} = C \cdot E \cdot \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2}{\varrho_1} \Delta p}$
ⓐ Querschnittsabtastung $\bar{c} = \frac{1}{A} \int_A c(A)\, dA$ hoher Aufwand, lange Meßzeiten.	Standardisierung enthält u. a.: Wirkdruckgeberform — Blende, Düse, Venturi-Düse Festlegung der Druckentnahmestellen — Eck-, Flansch-, (D-D/2)-Entnahme
ⓑ Messung von $c = \bar{c}$ an einem repräsentativen Ort, z. B. im Rohr mit $r = r_{\bar{c}}$, auch mehrfach um π oder $\pi/2$ versetzt	Berechnungsgleichungen für — Durchflußkoeffizient $C = f(\beta, Re)$ — Expansionszahl $\varepsilon = f(\beta, \varkappa, \tau)$ — Zuströmgeschwindigkeitsfaktor E
ⓒ Integrationssonde bildet durch geeignete, radial angeordnete Bohrungen mittleren Systemdruck Integrationskreuz verbessert und stabilisiert Mittelwert	$E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$; $\beta = \frac{d}{D}$; $\tau = \frac{p_2}{p_1}$ Einbauvorschriften Meßunsicherheiten
— großer Einsatzbereich — vorwiegend Kalibrierung erforderlich — Einbau- und Einsatzbedingungen sind geräte- und herstellerspezifisch — Standardisierung bedingt möglich	Standard: ISO 5167 (von 1980) Basis für DDR-Standard TGL 43 549 (1. 1. 1988).

Sie sind nicht standardisiert, müssen kalibriert werden und verursachen große Druckverluste. Damit vereinen sie wesentliche Nachteile beider Verfahren. Der relativ hohe Differenzdruck kann von Vorteil sein. Deshalb werden sie vorwiegend für Kontrollmessungen eingesetzt.

2. DDR-Standard TGL 43 549 zur Wirkdruck-Durchflußmessung

2.1. Anliegen und Inhalt der TGL 43 549

Für Durchflußmessungen nach dem Wirkdruckverfahren wurde in der DDR bis etwa 1982 als Richtlinie die DIN 1952 (alt) [8] als TGL 0-1952 empfohlen. Als Mitglied der Internationalen Organisation für Gesetzliche Metrologie OIML hat die DDR den Internationalen Standard ISO 5167 [9] bis auf geringfügige Änderungen und Ergänzungen als Basis für den DDR-Standard TGL 43 549 übernommen [10]. Die Bearbeitung erfolgte im VEB Junkalor Dessau unter Verantwortlichkeit des Kombinates EAW Berlin. Der Standard TGL 43 549 lag dem Autor bei der Abfassung des Manuskripts als Entwurf vom Dezember 1985 vor, ist inzwischen vom ASMW bestätigt und seit dem 1. Januar 1988 für Neuentwicklungen und Rekonstruktionen gültig. Es ist der erste verbindliche DDR-Standard zur Wirkdruck-Durchflußmessung.

Auf der Basis umfangreicher neuer Meßwerte mit geringeren Unsicherheiten konnten die Berechnungsgleichungen für Einflußzahlen neu, einfacher und genauer formuliert werden. Die Möglichkeiten der Entnahme für den Wirkdruck wurden erweitert. Hervorzuheben ist die Möglichkeit, Wirkdruckdurchflußmeßeinrichtungen so auszulegen, daß Meßunsicherheiten für den Volumenstrom von $\pm 0{,}6\%$ bis $\pm 1\%$ erreichbar werden.

Damit erhöhen sich aus meßtechnischer Sicht die Anforderungen an alternative moderne Druckflußmeßverfahren.

2.2. Einschränkungen bzw. Erweiterungen der TGL 43549 gegenüber ISO 5167

Gegenüber der ISO 5167 wurden „Klassische Venturi-Rohre" nicht aufgenommen. In den allgemeinen Teil wurden einige zusätzliche Berechnungsgleichungen eingefügt. Das Symbolverzeichnis und die Tabelle zur Auslegung von Wirkdruckgebern wurden erweitert. Im Anhang sind tabellarisch Expansionszahlen von Blenden zusätzlich enthalten.

2.3. Gliederung der TGL 43549, Hinweise

Die TGL 43439 enthält folgende inhaltliche Gliederung für die Hauptabschnitte:

1. Begriffe
2. Zeichen und Symbole
3. Meßprinzip und Berechnungsverfahren
4. Auswahl des Wirkdruckgebers
5. Allgemeine Anforderungen an die Messungen
6. Anforderungen an den Einbau von Wirkdruckgebern
7. Ausführung von Meßblenden
8. Meßdüsen
9. Venturi-Düsen

Anhang mit Tabellen zu Durchflußkoeffizienten C und zu Durchflußzahlen α aller Wirkdruckgeber und zu Expansionszahlen ε der Meßblenden.

Es wird besonders darauf verwiesen, daß die angegebenen (geringen) Meßunsicherheiten nur bei Einhaltung der Forderungen Gültigkeit haben, andernfalls muß mit höheren Unsicherheiten gerechnet werden.

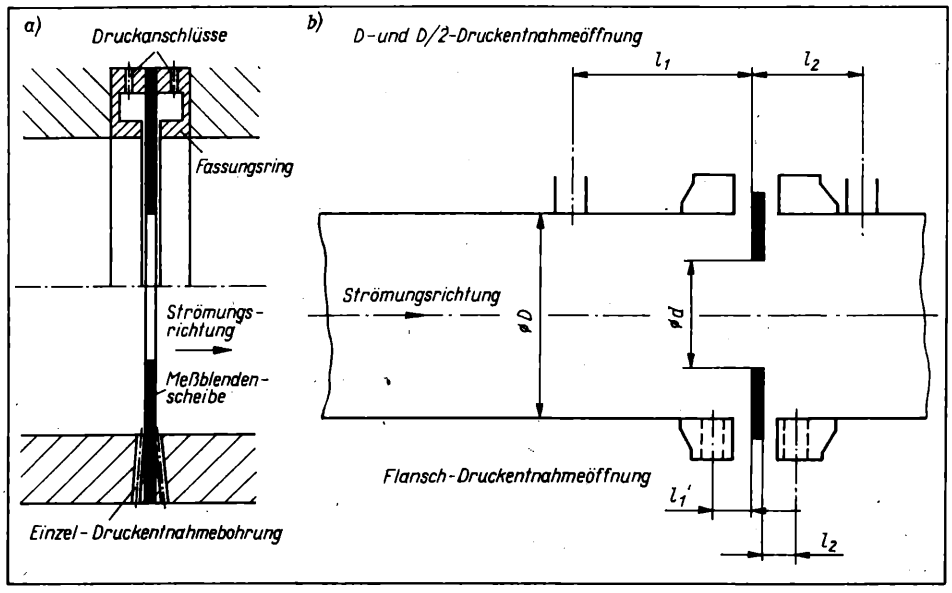


Bild. Anordnung der Druckentnahmeöffnungen für Meßblenden
a) Eckentnahme (oben Ringkammer, unten Einzelbohrungen);
b) oben: (D-D/2)-Entnahme, unten: Flanschentnahme

Tafel 2. Berechnungsgleichungen für Einflußzahlen zur Wirkdruckdurchflußmessung (TGL 43 549)

Wirkdruckgeber-bauart		Berechnungsgleichungen für Einflußgrößen			
		Durchflußzahl C			Expansionszahl ε
Blende		$C = 0{,}5959 + 0{,}0312\beta^{2{,}1} - 0{,}1840\beta^{8} + 0{,}0029\beta^{2{,}5} \cdot [10^6/Re]^{0{,}75} + 0{,}0900 L_1 \beta^4 (1-\beta^4)^{-1} - 0{,}0337 L_2' \beta^3$			$\varepsilon = 1 - (0{,}41 + 0{,}35\beta^4) \times \frac{\Delta p}{\varkappa \cdot p_1}$
			Eck-	Flansch-Entnahme	(D-D/2)-
		L_1 l_1/D	0	25,4/D für $D > 58{,}62$	1
				0,4333 für $D \leqq 58{,}62$	
		L_2' l_2'/D	0	25,4/D (D in mm)	0,47
Düse	kurz	$C = 0{,}9900 - 0{,}2262\beta^{4{,}1} + [0{,}000215 - 0{,}001125\beta + 0{,}002490\beta^{4{,}7}][10^6/Re]^{1{,}15}$			$\varepsilon = \left[\left(\frac{\varkappa \cdot \tau^{2/\varkappa}}{\varkappa - 1}\right) \times \left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4 \cdot \tau^{2/\varkappa}}\right) \times \left(\frac{1-\tau^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}}{1-\tau}\right)\right]^{0{,}5}$
	lang	$C = 0{,}9965 - 0{,}00653 \cdot \beta^{0{,}5}[10^6/Re]^{0{,}5}$			
Venturi-Düse		$C = 0{,}9858 - 0{,}196 \cdot \beta^{4{,}5}$			
		$\beta = d/D$ $Re = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D \cdot \nu}$		$\Delta p = p_1 - p_2$ $\tau = p_2/p_1$	

Der Standard ist auch für Meßblenden anwendbar, die den angegebenen Durchmesserbereich überschreiten. Dann gelten die angegebenen Unsicherheiten ebenfalls nicht mehr.

Für die Ausführung eichfähiger Meßstrecken mit Wirkdruckgebern gelten die Festlegungen dieses Standards als Mindestforderungen.

2.4. Auszugsweise Erläuterungen

Die allgemeingültige Form der Durchflußgleichung für Wirkdruckverfahren enthält Tafel 1. Gegenüber der alten Form ist jetzt physikalisch richtig und praktisch sinnvoll der Einfluß der Vorgeschwindigkeit erkennbar und in dem Zuströmfaktor E enthalten. Die Durchflußzahl wurde ersetzt durch $\alpha = C \cdot E$. Der Durchflußkoeffizient C ist besonders bei Blenden von der Reynolds-Zahl wenig abhängig. Damit genügt jetzt bei Rechnungen mit Sicherheit ein Iterationsschritt. Auch für die Auslegung vereinfachen sich die Rechnungen. Zudem sind die Berechnungsgleichungen für die Durchflußkoeffizienten C wesentlich einfacher und praktikabler geworden (Tafel 2).

Der Standard enthält genaue Hinweise für die Anbringung der Druck- und Temperaturmeßstellen zum Ermitteln der Dichte ϱ_1. Für die Wirkdruckentnahme haben sich die Möglichkeiten erweitert. Der Anwender kann sich aus meßtechnischer oder technologischer Sicht für geeignete Varianten entscheiden. Das Bild zeigt für Meßblenden die drei Anordnungen für Eck-, Flansch- und (D-$D/2$)-Druckentnahme. Mit diesem Bild wird auch das Verständnis für die Berechnungsgleichung von C aus Tafel 2 erleichtert.

Eine Hilfe bei der Auslegung von Wirkdruckgebern bietet die Übersicht von Tafel 3. Die Darstellung ist jedoch unvollständig und genügt allein nicht für diese Arbeiten. Die angegebenen Unsicherheiten werden beispielsweise nur erreicht, wenn die Meßstrecke über die geforderten störungsfreien geraden Rohrstrecken nach Angaben von Tafel 4 verfügt. Können diese aus Platzgründen nicht eingehalten werden, so besteht noch die Möglichkeit, standardisierte Strömungs-

Tafel 3. Kriterien zur Auswahl von Wirkdruckgebern nach TGL 43 543

Wirkdruckgeber		Meßblende		Meßdüse		Venturi-Düse
		Druckentnahmeöffnung		Ausführung		
		Eck	Flansch, D-D/2	kurz	lang	
Wirkdruckgeberöffnung d/mm		$\geqq 12{,}5$	$\geqq 12{,}5$	$\geqq 15$	$\geqq 12{,}5$	$\geqq 50$
Rohrdurchmesser D/mm		50 ... 1000	50 ... 760	50 ... 500	50 ... 630	65 ... 500
Durchmesserverhältnis β		0,23 ... 0,80	0,20 ... 0,75	0,30 ... 0,80	0,25 ... 0,80	0,316 ... 0,775
Reynolds-Zahl	Re_{min}	$5 \cdot 10^3$ $\beta = 0{,}23 \ldots 0{,}45$ $1 \cdot 10^4$ $\beta = 0{,}45 \ldots 0{,}77$ $2 \cdot 10^4$ $\beta = 0{,}77 \ldots 0{,}80$	$1260\beta^2 D$	$7 \cdot 10^4$ $\beta = 0{,}30 \ldots 0{,}44$ $2 \cdot 10^4$ $\beta = 0{,}44 \ldots 0{,}80$	$1 \cdot 10^4$	$1{,}5 \cdot 10^5$
	Re_{max}	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^6$
Relativer Wirkdruck $\Delta p/p_1$				$\geqq 0{,}25$		
Druckverlust	Δp_v			$\approx(1 - \beta^2) \cdot \Delta p$		$(0{,}05 \ldots 0{,}2)\,\Delta p$
Einbaulänge		kurz, Fassungsringbreite	sehr kurz, Blende zwischen Flanschen	kurz, Fassungsring sehr kurz, Scheibe		lang bis sehr lang entsprechend Diffusorlänge
Einfluß durch das Meßgut		korrodierendes und abtragendes Meßgut führt frühzeitig zur Abrundung der scharfen Kante; Schmutzablagerungen wirken ähnlich		Schmutzablagerungen haben nur anfangs einen Einfluß auf den Durchflußkoeffizienten; der Wert stabilisiert sich mit zunehmender Betriebszeit		
Erforderliche relative Rohrauhigkeit $10^4 k/D$		25 ... 3,9 mit steigendem β	$\geqq 25$ für $\beta < 0{,}4$ $\geqq 10$ für $\beta \geqq 0{,}4$	25 ... 3,9 mit steigendem β	$\leqq 10$	25 ... 3,9 mit steigendem β
Relative Meßunsicherheiten	u_{rC} für Durchflußkoeffizient	$\pm 0{,}6\,\%$, $\beta \leqq 0{,}6$ $\pm\beta\,\%$, $\beta > 0{,}6$		$\pm 0{,}8\,\%$, $\beta \leqq 0{,}6$ $\pm(2\beta - 0{,}4)\,\%$, $\beta > 0{,}6$	$\pm 2\,\%$	$(1{,}2 + 1{,}5\beta^4)\,\%$
	u_{re} für Expansionszahl	$\pm 4\,\Delta p/p\,\%$, $\beta \leqq 0{,}75$ $\pm 8\,\Delta p/p\,\%$, $\beta > 0{,}75$ $\pm 4\,\frac{\Delta p}{p}\,\%$		$\pm 2\,\frac{\Delta p}{p}\,\%$		$\pm(4 + 100\beta^8)\,\frac{\Delta p}{p}\,\%$
Kosten und Herstellung		Einfacher Aufbau, kostengünstig herstellbar		Aufwendigere Herstellung wegen des Einlaufprofils		Hoher Aufwand für Herstellung und Material

Tafel 4. Erforderliche störungsfreie gerade Rohrstrecken für Wirkdruckgeber in Abhängigkeit der Einbaustörungen (Vielfaches von D)

	Einlaufseite des Wirkdruckgebers										Auslaufseite
Durchmesserverhältnis	Einfacher 90°-Krümmer oder T-Stück (Störung nur von einer Seite)	Zwei oder mehr 90°-Krümmer in der gleichen Ebene	Zwei oder mehr 90°-Krümmer in verschiedenen Ebenen	Rohreinziehung (von $\leqq 2D$ auf D über eine Länge von $1{,}5D$ bis $3D$) nach TGL 23255/01; TGL 25142 u. TGL 38705	Rohrerweiterung (v. $0{,}5D$ auf D über eine Länge von $1D$ bis $2D$) analog TGL 23255/01; TGL 25142 u. TGL 38705	Ventil voll geöffnet	Schieber voll geöffnet	Symmetrische Durchmesserverringerung der Rohrleitung um mehr als die Hälfte innerhalb einer Länge $< 0{,}5D_1$	Thermometertasche mit einem Durchmesser $\leqq 0{,}03D$	Thermometertasche mit einem Durchmesser von 0,03 bis $0{,}13D$	Alle in dieser Tabelle aufgeführten Armaturen
0,20	10 (6)	14 (7)	34 (17)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)				4 (2)
0,25	10 (6)	14 (7)	34 (17)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)				4 (2)
0,30	10 (6)	16 (8)	34 (17)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)				5 (2,5)
0,35	12 (6)	16 (8)	36 (18)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)				5 (2,5)
0,40	14 (7)	18 (9)	36 (18)	5	16 (8)	20 (10)	12 (6)				6 (3)
0,45	14 (7)	18 (9)	38 (19)	5	17 (9)	20 (10)	12 (6)	30 (15)	5 (3)	20 (10)	6 (3)
0,50	14 (7)	20 (10)	40 (20)	6 (5)	18 (9)	22 (11)	12 (6)	für	für	für	6 (3)
0,55	16 (8)	22 (11)	44 (22)	8 (5)	20 (10)	24 (12)	14 (7)	alle β	alle β	alle β	6 (3)
0,60	18 (9)	26 (13)	48 (24)	9 (5)	22 (11)	26 (13)	14 (7)				7 (3,5)
0,65	22 (11)	32 (16)	54 (27)	11 (6)	25 (13)	28 (14)	16 (8)				7 (3,5)
0,70	28 (14)	36 (18)	62 (31)	14 (7)	30 (15)	32 (16)	20 (10)				7 (3,5)
0,75	36 (18)	42 (21)	70 (35)	22 (11)	38 (19)	36 (18)	24 (12)				8 (4)
0,80	46 (23)	50 (25)	80 (40)	30 (15)	54 (27)	44 (22)	30 (15)				8 (4)

gleichrichter einzubauen. Der Standard enthält die Ausführungsformen A (Zanker-Gleichrichter), B (Sprenkle-Gleichrichter) und C (Rohrbündel-Gleichrichter).

Zur Abschätzung der Meßunsicherheit des Massenstromes wird folgende Gleichung angegeben:

$$u_{\dot{m}} = \left[u_C^2 + u_\varepsilon^2 + \frac{1}{4} u_{\Delta p}^2 + \frac{1}{4} u_{\varrho_1}^2 + 4E^4 u_d^2 + 4\beta^8 E^4 u_D^2 \right]^{1/2}.$$

Sie ist leicht aus der Berechnungsgleichung für $\dot{m}$ herzuleiten und gilt ebenfalls für die Unsicherheit des Volumenstromes. Wohl unter Beachtung der Rolle der Durchflußmessung in den Bereichen der Energie- und Gaswirtschaft erfolgt der Hinweis auf Quellen für Stoffwerte von Wasser [11] und von Erdgasen [12].

3. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

In der Durchflußmeßtechnik auf der Basis von Differenzdruckmessungen wird die Einteilung in Staudruck- und Wirkdruckverfahren beibehalten. Unter den Staudruckverfahren verdienen besonders die Integrationssonden die Aufmerksamkeit. Sie gestatten bei geringem Druckverlust am ehesten Grundfehler von $\pm 1\,\%$.

Der energetische Gewinn durch geringeren Druckverlust muß die höheren Kosten für das Kalibrieren und für die Wartung kompensieren.

Die Wirkdruckverfahren gewinnen mit dem neuen Standard TGL 43 549 besonders durch die möglichen geringeren Unsicherheiten für die Einflußzahlen C und ε an Bedeutung.

Damit sind erneut die Hersteller von Differenzdruckmeßtechnik gefordert, Geräte der Fehlerklasse $\pm 0{,}4\,\%$ zur vollen Nutzung der gegebenen meßtechnischen Möglichkeiten anzubieten.

Für den Betriebsmeßtechniker bleiben auch nach Erscheinen des neuen Standards viele Fragen zum und beim praktischen Gebrauch von Wirkdruckverfahren unbeantwortet. Dazu gehören z. B. weitere Stoffwertangaben und Empfehlungen für die Projektierung und den Betrieb von Wirkdruck-Durchflußmeßeinrichtungen. Die Erarbeitung eines Handbuches hat sich der KDT-Fachunterausschuß „Durchflußmeßtechnik" in der WGMA zur Aufgabe gestellt. Es soll mit einem zur Zeit laufenden, gleichartigen ISO-Projekt abgestimmt werden.

Literatur

[1] KLUGE, H.: Gibt es Alternativen zur konventionellen Mengen- und Durchflußmeßtechnik? msr, Berlin 27 (1984) 4, S. 146–151.

[2] STROHRMANN, G.: atp-Marktanalyse Durchflußmeßtechnik. atp 28 (1986) 3, S. 122; 4, S. 169; 5, S. 243; 6, S. 274.

[3] ADUNKA, F.: Zur Genauigkeit der Wärmemessung. FWI 16 (1987) 1.

[4] SCHETININ, L.; URNER, G.: Volumenstrommessung mit Integrationsdruckröhrchen. Wiss. Zeitschrift der TU Dresden 28 (1979) 3, S. 667–669.

[5] ANNUBAR-Durchflußmessung. Firmenschriften.

[6] Autorenkollektiv: Empfehlung für die Berechnung und Montage primärer Durchflußwandler vom Typ „Integrationsröhrchen und Integrationskreuz". Ministerium für Melioration und Wasserwirtschaft der USSR, Odessa, 1979.

[7] GÖTTE, K.; HART, H.; JESCHKE, G.: Taschenbuch Betriebsmeßtechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1982.

[8] Durchflußmessung mit genormten Düsen. Blenden und Venturidüsen. DIN 1952 (1971).

(Fortsetzung auf Seite 234)

K. Schilder

Wirbel-Durchflußmesser für die Automatisierungstechnik

0. Einleitung

Der Wirbel-Durchflußmesser ursaflux W 3 des VEB Junkalor Dessau ist zur sicheren und wirtschaftlichen Messung von Gas- und Flüssigkeitsströmen einsetzbar.

Die neue Durchflußmessergeneration ist als Meßgerätesystem aufgebaut und bietet mit den Typenreihen sowie mit dem mikroprozessorgestützten Durchflußrechner vielfältige Einsatzmöglichkeiten mit vorteilhaften und anwendungsfreundlichen Eigenschaften.

Wirbel-Durchflußmesser sind zur Durchflußmessung mittlerer bis größerer Volumenströme geeignet. Die direkte Erfassung der Durchflußmenge und das digitale Meßprinzip ermöglichen eine hohe Meßgenauigkeit über den gesamten Meßbereich.

Die Typenreihen ursaflux W 3 zeichnen sich durch einfache Handhabung und Robustheit aus, verbunden mit geringem Montageaufwand und wartungsfreiem Betrieb. Mit den vorhandenen Prüf- und Anschlußmöglichkeiten erfüllt der Wirbel-Durchflußmesser ursaflux W 3 die Anforderungen an moderne Betriebsmeßgeräte.

1. Das Sensorsystem des ursaflux W 3

Grundlage der Messung für den Wirbel-Durchflußmesser bildet die Karmansche Wirbelstraße.

Bei der Umströmung eines Körpers durch gasförmige oder flüssige Stoffe treten periodische Wirbelablösungen auf, die in zwei Reihen mit der Strömung fortschwimmen und eine Wirbelstraße bilden (Bild 1). Diese Erscheinung ist nach dem Physiker THEODOR VON KÁRMÁN als Karmansche Wirbelstraße aus der Strömungstechnik bekannt.

Aus der Strömungsgeschwindigkeit c, der Störkörperbreite b und der Strouhal-Zahl S_r, einer dimensionslosen Wirbel-Kennzahl, ergibt sich die Wirbelfrequenz

$$f = S_r \frac{c}{b}.$$

Nach dieser Beziehung ist die Wirbelfrequenz proportional zur Strömungsgeschwindigkeit unter der Voraussetzung, daß die Strouhal-Zahl konstant ist.

Aus der Kontinuitätsbeziehung ergibt sich dann der durch die Rohrleitung mit dem Durchmesser D fließende Volumenstrom

$$\dot{V} = c \frac{D^2 \cdot \pi}{4}. \tag{1}$$

Die Wirbelbildung wird wesentlich durch Geometrie und Abmessungen des Wirbelkörpers beeinflußt. Durch experimentelle Untersuchungen ist eine optimale Form und Größe des Wirbelkörpers ermittelt worden, bei der die Strouhal-Zahl in einem weiten Bereich der Strömungsgeschwindigkeit unabhängig von Stoffeigenschaften konstant bleibt.

Die Verwendung eines trapezförmigen Wirbelkörpers mit scharfen Abrißkanten ermöglicht eine gleichmäßige Wirbelablösung bei guter Reproduzierbarkeit.

Die sich wechselseitig ablösenden Wirbel erzeugen in der Strömung nach dem Wirbelkörper periodische Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen. Durch eine am Wirbelkörper in Strömungsrichtung angebrachte Federplatte werden die Druckschwankungen erfaßt und durch einen eingebetteten piezoelektrischen Sensor elektrische

---

Dipl.-Ing. KLAUS SCHILDER (55) studierte Schiffsmaschinentechnik und war danach als Schiffsingenieur tätig. Von 1958 bis 1964 Studium Strömungstechnik an der Sektion Energieumwandlung der TU Dresden. Seit 1964 als Entwicklungsingenieur und Gruppenleiter für Dichte- und Durchflußmeßtechnik im VEB Junkalor Dessau/KEAW. Dort derzeit Themenleiter für die Durchflußmeßgeräteentwicklung.

Pulsfolgen erzeugt. Die Frequenz der Spannungspulse ist durchflußproportional und identisch mit der Frequenz der Wirbelablösung am Wirbelkörper.

In der praktischen Anwendung werden die Konstanten der Strömung sowie die geometrischen Abmessungen des Wirbelkörpers und des Meßrohrquerschnittes in einem Proportionalitätsfaktor zusammengefaßt, der durch eine Kalibrierung des Gerätes ermittelt wird.

Der Kalibrierungsfaktor K_I ist eine nennweitenabhängige Gerätekonstante und stellt den Zusammenhang zwischen der gemessenen Impulsfolgefrequenz f und dem Volumenstrom $\dot{V}$ dar

$$\dot{V} = \frac{f}{K_I} . \qquad (2)$$

Durch die Anordnung der Federplatte im mittleren Strömungsbereich sowie durch die oben und unten angebrachten Strömungsstabilisierungsplatten wird eine günstige Signalerfassung direkt in der Wirbelstraße erreicht. Die Lösung bietet eine großflächige Abtastung in der Wirbelstraße, wodurch eine integrierende Wirkung erzielt wird. Dadurch haben örtlich begrenzte Störungen in der Strömung, wie überlagerte Wirbelballen usw., wenig Einfluß auf die Signalbildung.

Das damit erreichte große Verhältnis von Nutz- zu Störsignal ergibt eine sehr genaue und zuverlässige Wirbelerfassung. Der Wirbelkörper mit dem voll eingeschweißten piezoelektrischen Sensor ist ein robustes Aufnehmersystem ohne bewegliche Teile, das sich durch große Zuverlässigkeit und gute Reproduzierbarkeit der Meßwerte auszeichnet. Eine genaue und betriebssichere Erfassung der Volumenströme in Rohrleitungen wird auf diese Weise erreicht.

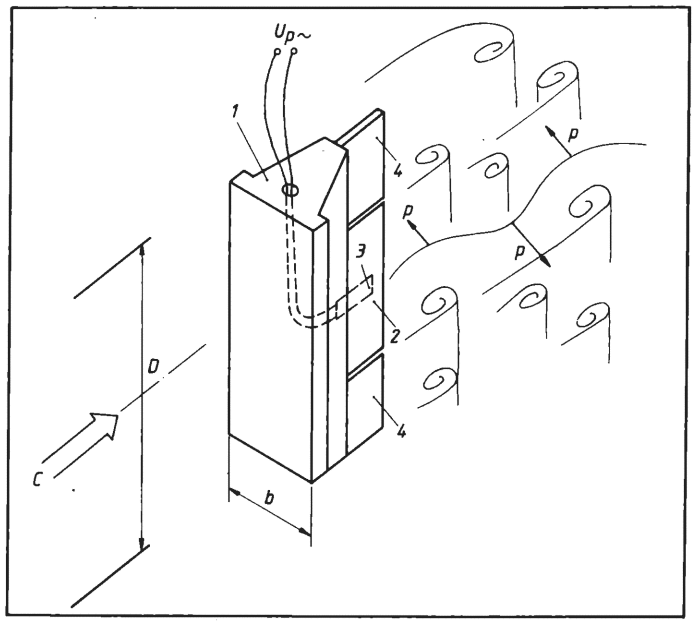


Bild 1. Meßprinzip ursaflux W 3
1 Wirbelkörper; *2* Federplatte; *3* piezoelektrischer Sensor; *4* Stabilisierungsplatte; *D* Rohrdurchmesser; *b* Wirbelkörperbreite; *c* Strömungsgeschwindigkeit; *p* Druckschwankungen; $U_{p\sim}$ Piezospannung

2. Geräteausführungen

2.1. Aufbau, Funktion und technische Daten des Wirbel-Durchflußmessers ursaflux W 3

Der ursaflux W 3 besteht aus den Funktionseinheiten Meßwertgeber (Bild 2) und elektronische Auswerteeinheit (Bild 3), die gehäusemäßig getrennt sind.

Der Meßwertgeber in Flanschausführung bildet mit dem Meßrohr und den Flanschen, dem Wirbelkörper mit Federplatte und piezoelektrischem Sensor eine konstruktive Einheit. Der komplette Wirbelkörpereinsatz ist austauschbar. Beim Meßwertgeber in Scheibenausführung ist die wirbelerzeugende Baugruppe in das scheibenförmige Rohrstück eingeschweißt. Meßwertgeber für Temperaturen über 100 °C haben einen verlängerten Rohraufsatz mit Kühlrippen (Bild 2).

Die Auswerteeinheit (Bild 3) enthält alle elektronischen Funktionsbausteine einschließlich Anzeigen für Volumen und Volumenstrom sowie bei Ex-Schutz den eigensicheren Meßkreis. Der elektrische Anschluß erfolgt auf der Rückseite des Gehäuses. Der Meßwertgeber und die Auswerteeinheit werden durch ein vieradriges abgeschirmtes Kabel miteinander verbunden. Der Wirbel-Durchflußmesser ursaflux W 3 umfaßt folgende Typenreihen:

1605—1612: Geber in Flanschausführung für Temperaturen bis 100 °C
1613—1620: Geber in Flanschausführung für höhere Temperaturen bis 180 °C
1631—1634: Geber in Scheibenausführung für Temperaturen bis 100 °C
1635—1638: Geber in Scheibenausführung für höhere Temperaturen bis 180 °C.

Die Geber in der jeweiligen Ausführungsart, Flansch- oder Scheibenausführung, weisen einen einheitlichen konstruktiven Aufbau für Gas- und Flüssigkeitsmessungen auf. Als Werkstoff für das Gebergehäuse bei der Flanschausführung kommen wahlweise X 8 CrNiTi 18.10 oder Stahl zum Einsatz. Der Wirbelkörpereinsatz besteht grundsätzlich aus CrNi-Stahl.

Die Typenreihen sind mit den anwendungsbezogenen Varianten der Auswerteeinheit komplettierbar. Alle Varianten besitzen einen einheitlichen Grundaufbau und sind durch unterschiedliche Leiter-

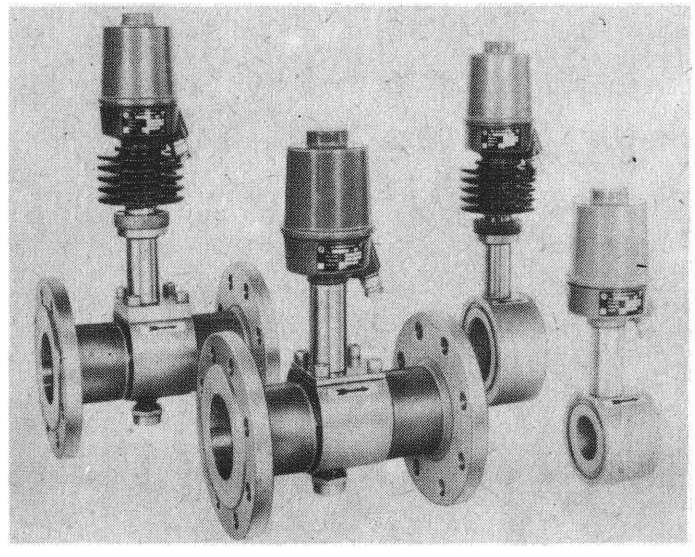


Bild 2. Meßwertgeber ursaflux W 3

Bild 3. Auswerteeinheit ursaflux W 3

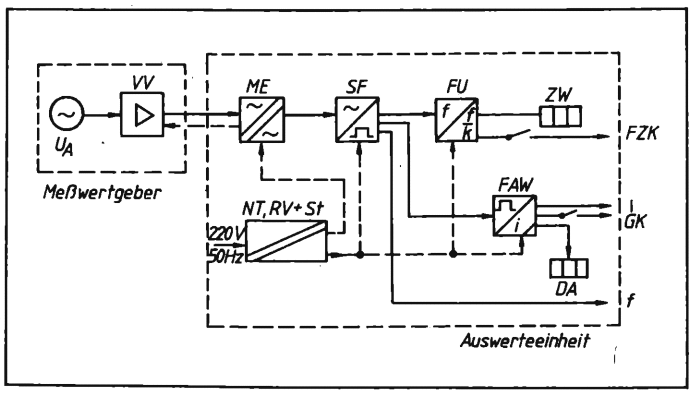


Bild 4. Funktionsschema des ursaflux W 3
U_A piezoelektrischer Aufnehmer; *VV* Vorverstärker; *ME* Meßeingang (eigensicher); *SF* Signalformer; *FU* Frequenzuntersetzer; *FAW* Frequenz-Analog-Wandler; *NT* Netzteil; *RV + St* Rückverdrahtung und Stabilisierung; *ZW* Zählwerk (Volumenzählung); *FZK* Fernzählkontakt; *DA* Digitalanzeige (Volumenstromanzeige); *I* Einheitsstromsignalausgang (0 bis 5 mA; 0 bis 20 mA; 4 bis 20 mA); *f* Meßfrequenzausgang (TTL); *GK* Grenzkontakteinrichtung für Meßbereichsunterschreitung und -überschreitung

plattenbestückung umrüstbar. Die einfachste Ausführung enthält nur einen Meßfrequenzausgang ohne Anzeigen. Die Funktionsweise des ursaflux W 3 soll anhand des Schemas im Bild 4 erläutert werden.

Die vom piezoelektrischen Sensor durch die Wirbelablösung erzeugten Spannungspulse werden über Impedanzwandlung und Dämpfung im Vorverstärker in ein über größere Entfernungen übertragbares Wechselspannungssignal verstärkt. In der Auswerteeinheit wird im Meßeingang eine galvanische Trennung des Meßsignals des Vorverstärkers von den übrigen Funktionsgruppen für den Ex-Schutz vorgenommen. Außerdem erfolgt in dieser Baugruppe die Aufbereitung der Speisespannung für den eigensicheren Meßwertgeber.

Tafel 1. Technische Daten der Wirbel-Durchflußmesser

Nennweiten	DN 50, 80, 100, 150		
maximaler Nenndruck	PN 10 MPa		
Meßstofftemperaturen	−25 °C bis 100 °C +20 °C bis +180 °C		
maximaler Durchfluß	DN	Gase	Flüssigkeiten
	50	200 m³/h	50 m³/h
	80	500 m³/h	110 m³/h
	100	800 m³/h	170 m³/h
	150	1600 m³/h	380 m³/h
Ex-Schutz	eigensicherer Meß- und Stromversorgungskreis		
zulässige Umgebungstemperaturen	Meßwertgeber −25 °C bis +70 °C Auswerteeinheit −10 °C bis +50 °C		
Schutzgrad	IP 54		
ungestörte gerade Meßstrecke	mindestens 10 · DN Einlauf mindestens 5 · DN Auslauf		
Kabellänge	maximal 500 m zwischen Geber und Auswerteeinheit		
Versorgungsspannung	220 V + 10/−15%, 50 Hz		
Masse (je nach Geräteausführung)	Meßwertgeber 9 bis 60 kg Auswerteeinheit maximal 8 kg		
Meßfehler	Gase ± 1% vom Meßwert Flüssigkeiten ± 0,6% vom Meßwert		
Reproduzierunsicherheit	<0,2%		

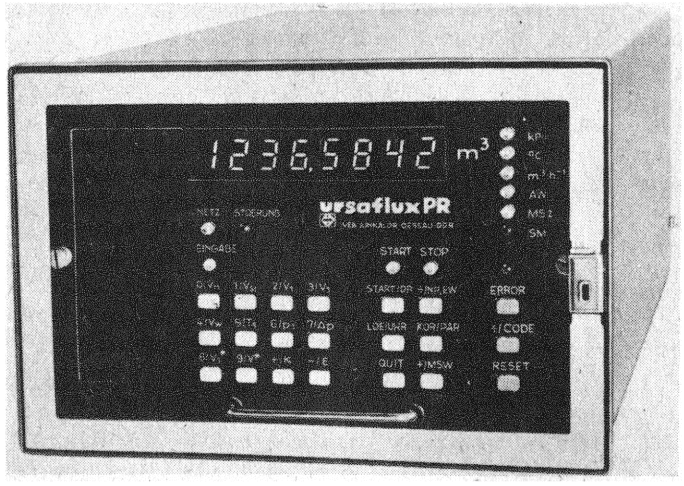


Bild 5. Durchflußrechner ursaflux PR

Der Signalformer enthält für Gasgeräte als Filter zwei aktive Hochpässe, die über getrennte Trigger frequenzabhängig geschaltet werden. Diese Hochpässe sind nennweitenspezifisch eingestellt. Das Meßsignal wird weiterhin verstärkt und in Rechteckimpulse mit TTL-Pegel umgewandelt.

Der Frequenz-Analogwandler erfüllt die Funktionen: Wandlung der Meßfrequenz in Einheitsstromsignale, Spannungsausgang zur Ansteuerung der Volumenstromanzeige und Anzeige der Meßbereichsunterschreitung und -überschreitung.

Im Frequenzuntersetzer wird die Meßfrequenz geteilt und durch Einstellung des Kalibrierungsfaktors erfolgt eine Normierung für die Ansteuerung des elektromechanischen Zählwerkes und der Betätigung des potentialfreien Fernzählkontaktes. Weiterhin ist eine wahlweise Blockierung der Volumenzählung bei Meßbereichsunterschreitung möglich.

In Tafel 1 sind die wichtigsten technischen Daten des Durchflußmessers ursaflux W 3 zusammengefaßt.

2.2. Prozeßrechner „ursaflux PR"

Der Durchflußrechner ist ein Zusatzgerät für den Wirbel-Durchflußmesser, der die Meßgrößen Volumen und Volumenstrom von Gasen vom Betriebszustand in den Norm- oder Standardzustand umrechnet. Bei Flüssigkeiten wird eine Umrechnung vom Betriebszustand in einen Bezugszustand, vorwiegend 20 °C, vorgenommen. Durch Software- und Hardwarevarianten sind weitere Anwendungsvarianten auch für Wirkdruckmessungen gegeben.

Das zentrale Element des ursaflux PR ist der Mikroprozessor U 880, der neben der Durchführung mathematischer Operationen auch Eingabe- und Ausgabebefehle und in Verbindung mit weiteren Funktionsbaugruppen Speicherungs- und Prüfungsmöglichkeiten sowie den Informationsaustausch mit dem Anwender realisiert. Die Funktionsbaugruppen des Durchflußrechners sind in einem EGS-Gehäuse untergebracht und als Einschub ausgeführt.

Auf der Frontplatte befinden sich die Anzeige-, Bedien- und Prüfelemente. Die Rückseite des Gehäuses enthält den Kabelanschlußraum mit den Anschlußklemmen.

Das Display dient in der Programmierphase zur Kommunikation mit dem Bediener, um auch vor Ort die Meßbereiche der Anschlußgeräte einschließlich Kalibrierungswert des Volumenstromgebers einzugeben. In der Betriebsphase können außer der ständigen Anzeige des umgewerteten Volumens alle Eingangs- und Ausgangsgrößen als Wahlanzeigen über die Tastatur abgefordert werden.

An der Frontseite des Durchflußrechners ist für Prüfzwecke ein Steckverbinder angebracht, an dem der Rechnerbus anliegt.

Hard- und Software sind modular aufgebaut. Die Leiterplatten sind gesteckt. Das Betriebssystem ist in 12 Kbyte EPROM abgelegt.

Tafel 2. Technische Daten des Durchflußprozeßrechners

Versorgungsspannung	220 V + 10/—15%, 50 Hz oder 18 bis 32 V GS
Leistungsaufnahme	maximal 45 VA
zulässige Umgebungstemperaturen	+5 °C bis +40 °C
Schutzgrad	IP 42, frontseitig IP 54
Eingangssignale	1 Impulssignal 6 Einheitsstromsignale
Abmessungen	240 × 160 × 500 mm³
Masse	maximal 11 kg

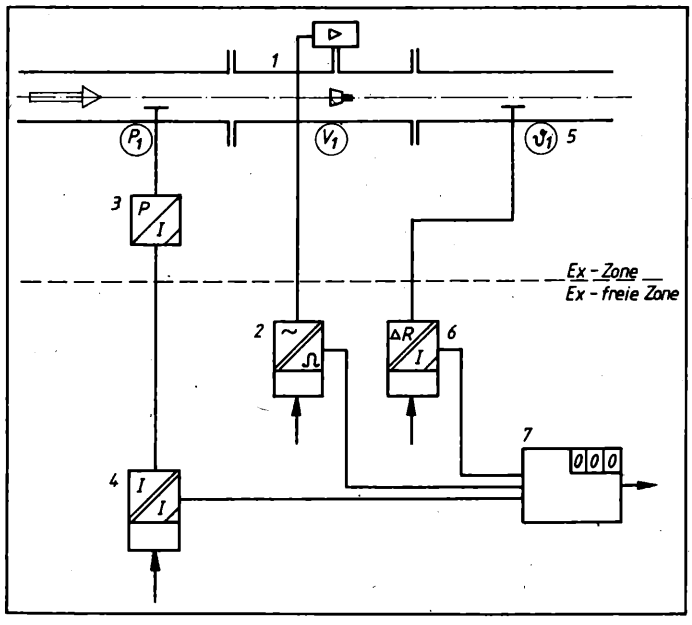


Bild 6. Wirbel-Durchflußmeßeinrichtung ▶
1 Meßwertgeber ursaflux W 3; *2* Auswerteeinheit ursaflux W 3; *3* Druckmeßumformer; *4* Speisegerät mit Potentialtrenner; *5* Temperaturgeber Pt 100; *6* Feldmeßumformer; *7* Durchflußrechner ursaflux PR

Meßwerte und am Einsatzort eingegebene Parameter werden in einem batteriegepufferten und gegen Überschreiben geschützten RAM aufbewahrt.

Vom Rechner werden weitere Aufgaben, wie Sinnfälligkeitstests, Programmüberwachungsroutinen einschließlich Überwachung der Eingangsgrößen durchgeführt.

Die Ausgabe von kodierten Fehleranzeigen ermöglicht eine schnelle Fehlerlokalisierung.

3. Erfassung von Gasströmen in Rohrleitungen mit Umwertung durch Mikrorechner

Anhand eines Beispiels für die Gasmessung soll eine Wirbel-Meßeinrichtung mit Mikrorechnerumwertung erläutert werden. Mit dem Wirbel-Durchflußmesser ursaflux W 3 und dem Durchflußrechner ursaflux PR kann in Verbindung mit Meßumformern für Druck und Temperatur eine genaue Volumenmessung von strömenden Gasen in Rohrleitungen mit einer Volumenumwertung auf Norm- oder Standardzustand erreicht werden.

Die hohe Genauigkeit bietet die Voraussetzung, Energiemengen exakt zu erfassen und damit Industrieprozesse energieökonomisch zu beeinflussen.

Die Gasmeßeinrichtung besteht aus den Haupteinheiten:

— Wirbel-Durchflußmesser mit Einlauf- und Auslaufstrecke
— Druck- und Temperaturmeßumformer
— Durchflußrechner.

Der grundsätzliche Aufbau einer Meßeinrichtung ist im Bild 6 dargestellt.

Das Frequenzsignal des Wirbel-Durchflußmessers und die Einheitsstromsignale der Druck- und Temperaturmeßumformer bilden die Eingangssignale für den Durchflußrechner.

Der gemessene Betriebsvolumenstrom $\dot{V}_1$ von Gasen ist eine Funktion der Zustandsgrößen Druck p_1 und Temperatur T_1 im Betriebszustand sowie bei realen Gasen abhängig von der Kompressibilitätszahl K_1. In der Gastechnik muß auf einen Bezugszustand umgerechnet werden, damit das Gasvolumen als Meß- und Abrechnungsgröße verwendet werden kann. Verwendung finden als Bezugszustände der Normzustand mit den Zustandsgrößen $p_n = 101{,}325$ kPa, $T_n = 273{,}15$ K und der Standardzustand mit $p_{st} = 101{,}325$ kPa, $T_{st} = 288{,}15$ K.

Der umgewertete Volumenstrom ergibt sich aus folgenden Gleichungen:

Normzustand

$$\dot{V}_n = \dot{V}_1 \frac{p_1 + p_b}{101{,}325} \cdot \frac{273{,}15}{273{,}15 + \vartheta_1} \cdot \frac{1}{K_1}, \quad (3)$$

Standardzustand

$$\dot{V}_{st} = \dot{V}_1 \frac{p_1 + p_b}{101{,}325} \cdot \frac{288{,}15}{273{,}15 + \vartheta_1} \cdot \frac{1}{K_1}, \quad (4)$$

mit dem Volumenstrom des Wirbel-Durchflußmessers

$$\dot{V}_1 = \frac{f_1 \cdot 3600}{k_f} \text{ (in m}^3\text{/h)}.$$

f_1 Frequenz; K_f Kalibrierungskonstante; p_b eingegebener oder gemessener Barometerdruck

Die Kompressibilität wird dem Rechner in Abhängigkeit von Druck und Temperatur als Matrix für die jeweilige Gasart eingegeben und ist als Tabelle abgelegt.

Auf dem 8stelligen LED-Display wird das Volumen im Norm- oder Standardzustand ausgegeben. Nach Abruf über das Tastenfeld können außerdem Meßwerte an den Eingängen, am Einsatzort programmierte Werte, aktueller Wert der Kompressibilität, Volumen im Störfall, Kode der vorhandenen Fehler, Uhrzeit usw. zur Anzeige kommen.

Mit dem Rechner können die zulässigen Meßbereiche des Volumengebers und des Druck- und Temperaturmeßumformers überwacht werden. Auch zulässige Änderungsgeschwindigkeiten des Volumenstromes, des Betriebsdruckes und der Betriebstemperatur sind kontrollierbar.

Die Meßwerte und das umgewertete Volumen können über ein paralleles und serielles Interface an einen übergeordneten Rechner gegeben werden.

Zusammenfassung

Mit dem Wirbel-Durchflußmesser ursaflux W 3 und dem Durchflußprozeßrechner ursaflux PR wird dem Anwender eine neue Gerätegeneration zur Durchflußmessung von Rohstoff- und Energiemengen in Rohrleitungen angeboten.

Die Typenreihen ursaflux W 3 mit ihrer breiten Anwendung in vielen Industriezweigen kennzeichnen den internationalen Stand. Durch den Einsatz dieser modernen Geräte werden Durchflußmengen mit hoher Genauigkeit und sehr zuverlässig erfaßt. Mit den Geräteausführungen ursaflux W 3 können auch besondere und schwierige Meßaufgaben gelöst werden. Beispiele sind:
Feuchtes Chlor mit mechanischen Verunreinigungen, Gase mit Ölnebel und kondensierenden Stoffen, Flüssigkeiten und Gase mit geringen Feststoffanteilen usw.

Der Durchflußprozeßrechner führt die Umrechnung der Meßgrößen Volumen und Volumenstrom vom Betriebszustand in den Norm- oder Standardzustand durch. Durch Software- und Hardwarevarianten sind weitere Anwendungsmöglichkeiten realisierbar. Wirbel-Durchflußmesser haben aufgrund ihrer Vorteile einen festen Platz in der Durchflußmeßtechnik eingenommen und sind an der Lösung einer Vielzahl von Durchflußmeßaufgaben beteiligt.

Das Geräteprogramm der Wirbel-Durchflußmesser wird in den kommenden Jahren ständig erweitert.

msr 8832

W. Schmidt, O. Skerl, O. Fiedler

Akustische Doppler-Strömungsmessung

0. Einleitung

Strömungsgeschwindigkeits- und Durchflußmeßverfahren nach dem akustischen Doppler-Prinzip gewinnen wachsende Bedeutung für die Diagnose und Überwachung von Strömungssystemen in der Automatisierungstechnik, der Medizin, der Biotechnologie und im Umweltschutz. Ebenso wie der akustische Mitführeffekt ermöglicht der Doppler-Effekt eine eingriffsfreie Messung. Da die meisten Gefäßwände akustisch transparent sind, können Sende- und Empfangsschwinger außen an Rohre, Schläuche oder Kanalwände angesetzt (clamp on) und beliebig verschoben werden. Derartige Meßsysteme haben den Vorteil hoher Mobilität. Gegenüber dem Mitführeffekt hat die Doppler-Methode folgende Besonderheiten:

- Das Verfahren verlangt Streuteilchen im Fluid; sie müssen der Strömung schlupflos folgen.
- Die Ortsauflösung kann wesentlich größer sein, denn die Meßsignale kommen aus dem Schnittvolumen von Sende- und Empfängerstrahl.
- Die Distanz des Meßvolumens ist einstellbar.
- Strömungsgeschwindigkeiten sind in Rückstreuung meßbar.
- Unterschiedliche Teilchengeschwindigkeiten im Meßvolumen liefern ein Frequenzspektrum (Doppler-Spektrum).

Das Meßverfahren versagt, wenn die Streuteilchen zu klein oder die Streuteilchendichten zu groß werden und die Meßsignale im Rauschen untergehen.

Für Durchflußmessungen braucht man die Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt, bei radialsymmetrischer Strömung die Verteilung über den Radius. In diesem Fall sind Informationen über die Lage und die Größe des abtastenden Volumens im Fluid erforderlich. Aus dem gemessenen Doppler-Spektrum soll dann auf die über den Querschnitt gemittelte Geschwindigkeit und damit auf den Volumenstrom geschlossen werden. Wesentliche Aufgabe der Meßelektronik ist es, dafür die Doppler-Spektren in geeigneter Weise auszuwerten.

1. Meßprinzip und Meßbedingungen

Das der Strömung folgende Streuteilchen ist im Feld des Schallstrahles ein bewegter Empfänger und Sender von Schallwellen. Nach dem Doppler-Effekt entsteht eine Frequenzverschiebung, die Doppler-Frequenz f_D. Sie ist der Relativgeschwindigkeit v zwischen Streuteilchen und Schallwandler proportional (Bild 1)

$$f_D = 2 \cdot f_0 \cdot \cos \alpha \cdot v/c \,. \tag{1}$$

f_0 Sendefrequenz; α Einstrahlwinkel; c Schallgeschwindigkeit im Fluid

Da die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur, der Dichte und der Zusammensetzung des Fluids abhängt und kleine Änderungen dieser Größen sehr stark die Doppler-Verschiebung beeinflussen, ist es günstig, diesen Einfluß mit Hilfe einer Vorlaufstrecke bekannter Schallgeschwindigkeit c' zu eliminieren. Eine solche Vorlaufstrecke ist z. B. eine Schallstrecke in Harz, in das ein Piezoschwinger

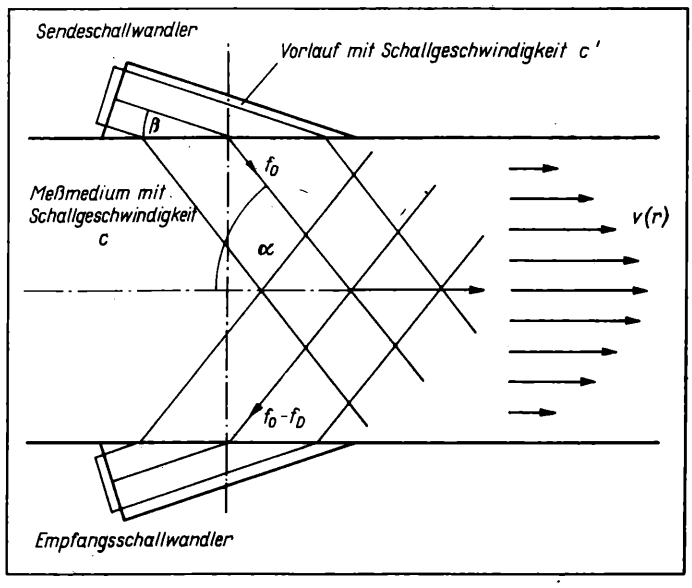


Bild 1. Prinzip der akustischen Doppler-Strömungsmessung

eingegossen ist. Nach dem Brechungsgesetz von SNELLIUS ist (Bild 1)

$$\cos \alpha/c = \cos \beta/c' \,. \tag{2}$$

Aus (1) wird

$$f_D = 2 \cdot f_0 \cdot \cos \beta \cdot v/c' \,. \tag{3}$$

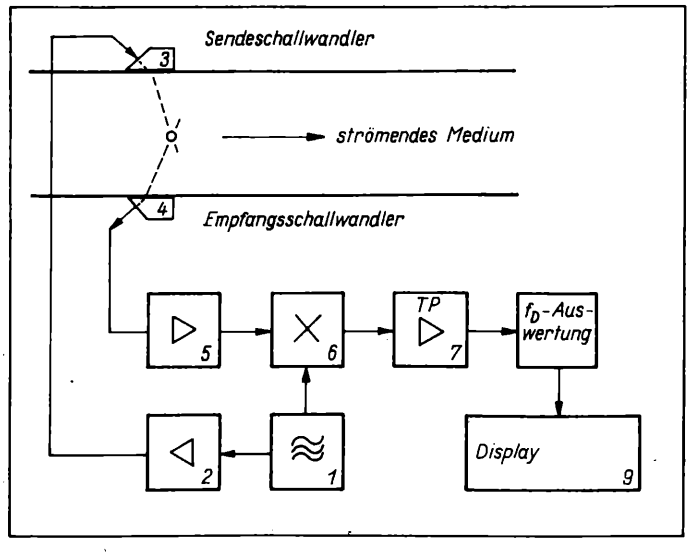
Die Doppler-Verschiebung ist damit unabhängig von der Schallgeschwindigkeit im Fluid. Der Faktor $\cos \beta/c'$ ist gut bestimmbar und überwachbar.

Bei der Wahl der Sendefrequenz muß ein Kompromiß zwischen Geschwindigkeitsauflösung und Schallabsorption eingegangen werden. Strömungsgeschwindigkeitsmessungen in Flüssigkeiten werden mit Frequenzen zwischen 1 MHz und 10 MHz und in Gasen zwischen 100 kHz und 200 kHz durchgeführt.

Der Meßbereich für die Strömungsgeschwindigkeit wird einerseits von der Größe und Konzentration der Streuteilchen und andererseits von der Empfangselektronik bestimmt. Das Signal/Rausch-Verhältnis wird kleiner, wenn

- sich die Geschwindigkeit verringert und die Doppler-Frequenz in den Bereich des Funkelrauschens und hoher Umgebungsstörspannungen fällt (50 bis 100 Hz)
- die Bandbreite für den Meßbereich vergrößert wird.

Bild 2. Blockschaltbild eines Doppler-Strömungsmessers



Dipl.-Ing. WOLFRAM SCHMIDT (26) studierte von 1982 bis 1987 an der Sektion Technische Elektronik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock. Seit 1987 dort Forschungsstudent.

Dipl.-Ing. OLAF SKERL (26) studierte von 1982 bis 1987 Technische Kybernetik und Automatisierungstechnik an der Sektion Technische Elektronik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock. Seit 1987 dort wissenschaftlicher Assistent.

Prof. Dr. sc. nat. OTTO FIEDLER wurde bereits auf S. 194 dieses Heftes vorgestellt.

In mehrere Bereiche unterteilt, messen Doppler-Strömungsmesser Geschwindigkeiten von 0,05 m/s bis 10 m/s.

Bild 2 zeigt das Blockschaltbild eines akustischen Doppler-Strömungsmessers. Der HF-Oszillator *1* liefert die Sendefrequenz f_0, die im Leistungsverstärker *2* verstärkt und vom Sendeschallwandler *3* in Form von Schallwellen ins Meßmedium abgestrahlt wird. Am Empfangsschallwandler *4* wird das reflektierte oder gestreute, frequenzverschobene Signal in eine elektrische Spannung gewandelt und im Empfangsverstärker *5* verstärkt. Im Mischer *6* erfolgt die Trennung von Doppler-Verschiebung und Sendefrequenz durch multiplikative Mischung. Der nachgeschaltete Tiefpaß und NF-Verstärker *7* filtert höherfrequente Störungen aus und liefert das Doppler-Signal, ein Spektrum, das nach einem geeigneten Verfahren bewertet werden muß *8*, um die mittlere Strömungsgeschwindigkeit bzw. den Durchfluß auf einem Display *9* zur Anzeige zu bringen. Probleme, die beim Empfängeraufbau und besonders bei der Doppler-Frequenzauswertung auftreten, werden nachfolgend behandelt.

2. Probleme der Meßwertgewinnung

2.1. Richtungserkennung

Das Direktmischverfahren von Sende- und Empfangsfrequenz liefert keine Information über die Strömungsrichtung. Hier wird nur die Differenz zwischen Sende- und Empfangsfrequenz gebildet und der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit gemessen. Die Richtungsbestimmung erfordert zusätzlichen elektronischen Aufwand, so z. B. die Einführung einer Hilfsfrequenz f_h, mit der das Empfangsspektrum verschoben wird (Frequenz-Shiftung). Im ruhenden Fluid liefert der Empfänger die Frequenz f_h und im bewegten Fluid je nach Strömungsrichtung $f_h + f_D$ oder $f_h - f_D$. Das Abtrennen der Zwischenfrequenz und das Erkennen des Vorzeichens kann z. B. mit einer Filterkombination erfolgen, wodurch das Dopplersignal je nach Vorzeichen über das obere oder untere Seitenband zur Auswertung gelangt.

2.2. Standsignal

Darunter ist das Empfängersignal zu verstehen, das durch die akustische Kopplung von Sende- und Empfangsschwinger, insbesondere über das Schwingergehäuse und die Gefäßwand, entsteht. Es hat die Frequenz des Sendeschwingers. Seine Amplitude kann wesentlich höher als die des Nutzsignales sein, in ungünstigen Fällen um mehrere Größenordnungen darüber liegen. Dadurch ist eine Empfängerregelung erschwert. Da die Doppler-Verschiebung gegen das Standsignal klein ist, entfällt eine Sperrfilterung. In jedem Fall sind Sender und Empfänger akustisch so gut wie möglich zu entkoppeln, um das Standsignal auf niedrigem Niveau zu halten.

2.3. Nutzsignalaussetzer

Das Nutzsignal ist von der Größe und Dichte der Streuteilchen abhängig. Änderungen dieser Parameter führen zu Schwankungen der Signalamplituden bis hin zum Aussetzen des Nutzsignales. Da das Meßverfahren auf Fluide unterschiedlicher Zusammensetzungen und Streuteilchenkonzentrationen angewendet werden soll, ist eine Empfängerregelung unbedingt erforderlich.

2.4. Meßvolumen und Durchfluß

Rein geometrisch ist das Meßvolumen das Schnittvolumen von Sende- und Empfängerstrahl. Je nach Streuteilchengröße und -konzentration kann die Größe des Volumens, aus dem auswertbare Doppler-Signale empfangen werden, davon abweichen. Auch die Lage des Meßvolumens ist aufgrund der Unschärfe der Einstrahlwinkel nicht genau fixiert. Je nach Größe und Lage des Meßvolumens im Profil der Strömung erhält man ein für dieses Volumen typisches Spektrum von Doppler-Frequenzen. Sie Simulation des Abtastprozesses der Strömung mit rechentechnischen Mitteln liefert Einsichten in die Komplexität der Meßwertgewinnung. Sie ist eine wertvolle Grundlage für eine günstige Gestaltung der Meßstrecke und für die Berechnung der für den Durchfluß wichtigen mittleren Strömungsgeschwindigkeit.

3. Frequenzauswertung

Die Doppler-Frequenz wird vielfach nach der Zero-Crossing-Methode (Nulldurchgangsmethode) gemessen (Bild 3). Das Maß für die Frequenz ist die Anzahl von Nulldurchgängen in einem vorgegebenen Zeitintervall. Systematische Fehler ergeben sich dadurch, daß die Meßzeit beschränkt ist und daß Signale zu kleiner Amplitude den Zähler nicht triggern. Erfahrungsgemäß werden Fehler kaum unter 5% erreicht [1].

Die elektronische Bestimmung des Maximums im Frequenzspektrum kann durch Triggern mit nachgeführter Hysterese erfolgen. Die Schalthysterese des Triggers wird jeweils aus dem Spitzenwert der vorhergegangenen Signalspannung abgeleitet (Bild 4). Das Maximum ist allerdings von verschiedenen Faktoren abhängig und zur Bestimmung des Durchflusses nur bedingt geeignet.

Eine weitere Methode ist die spektrale Mittelwertbildung durch entsprechende Bewertung des Leistungsdichtespektrums des Empfangssignals. Das erfolgt in einer Auswerteelektronik, die folgende Gleichung nachbildet:

$$f_m = \frac{1/2\pi T \int_B F^2(\omega)\, \omega \, d\omega}{1/2\pi T \int_B F^2(\omega)\, d\omega} . \qquad (4)$$

Diese Methode der Frequenzauswertung hat den Vorteil, daß das damit ermittelte Moment von vielen Einflußfaktoren, die z. B. die Bandbreite des Spektrums beeinflussen, unabhängig ist. In der Literatur werden sehr gute Ergebnisse auch bei Signal-Rauschabständen bis zu 0 dB angegeben [2] und [3]. Schließlich soll noch ein Verfahren genannt werden, bei dem die Halbierung des Leistungsdichtespektrums durch nachgeführte Filter erfolgt und die Frequenz der „halben Leistung" ermittelt wird (Bild 5) [4]. Zur Genauigkeit liegen den Autoren keine Erkenntnisse vor.

4. Simulation der Doppler-Strömungsmessung

Zur rechnerischen Simulation der Doppler-Strömungsmessung auf einem Bürocomputer wurden folgende Vereinfachungen gemacht:

- Dämpfungsverluste sowohl beim Durchschallen der Rohrwand als auch bei der Ausbreitung im Fluid bleiben unberücksichtigt.
- Das Meßvolumen befindet sich im Nahfeld der Schallstrahlen (keine Divergenz).
- Sende- und Empfangsschwinger haben gleiche Richtcharakteristika.

Das entwickelte Programm beinhaltet eine mathematische Modellierung des Meßvolumens als Schnittvolumen der Schallstrahlen von

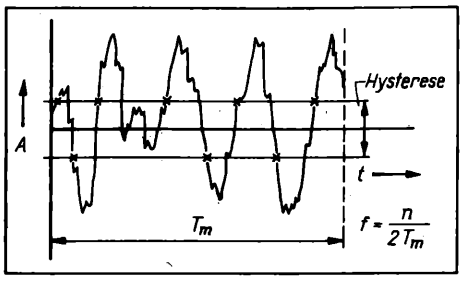


Bild 3. Frequenzauswertung nach der Zero-Crossing-Methode

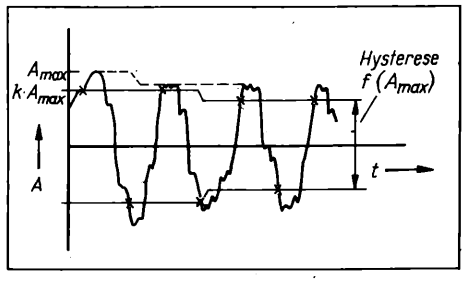


Bild 4. Frequenzauswertung durch Trigger mit nachgeführter Hysterese

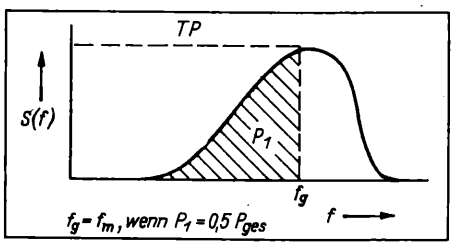


Bild 5. Doppler-Frequenzanalyse durch Halbieren des Spektrums mit nachgeführtem Tiefpaßfilter

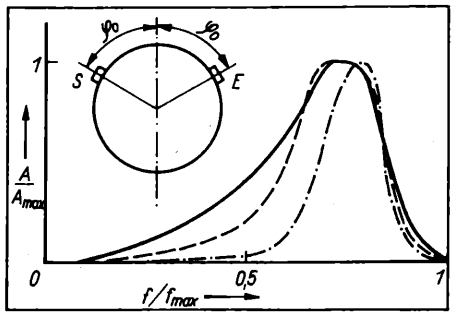


Bild 6. Normierte Ergebnisse von Simulationsrechnungen
Parameter: turbulente Strömung, Einstrahlwinkel $\alpha = 45°$;
——— $\varphi_0 = 20°$; – – – – $\varphi_0 = 45°$; —·—·— $\varphi_0 = 90°$

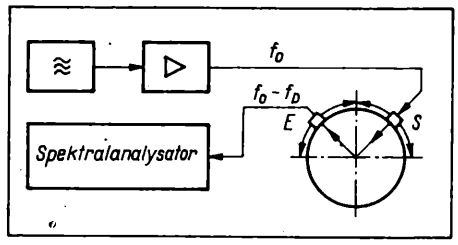


Bild 7. Aufbau zur Analyse realer Doppler-Frequenzspektren

Sende- und Empfangsschwinger. Die Intensitätsverteilung im Schallstrahl ist wählbar, ebenso die Winkeleinstellung der Schwinger zueinander und zur Achse des Rohres. Die streuenden Partikel im Fluid sollen gleichverteilt sein. Die Geschwindigkeit jedes Teilchens wird entsprechend seiner Lage und dem vorgegebenen Strömungsprofil bewertet. Die Berechnung des Doppler-Frequenzspektrums erfolgt durch äquidistante Abtastung des Rohrvolumens, das das Meßvolumen beinhaltet, die Berechnung der Doppler-Verschiebung und des Beitrages eines jeden Punktes zum Empfängersignal durch Akkumulation dieses Beitrages in der entsprechenden Frequenzklasse. Nach beendeter Abtastung kann das Spektrum, das sich aus den Inhalten der einzelnen Frequenzklassen zusammensetzt, im Diagramm oder als Wertetabelle dargestellt und der spektrale Mittelwert durch Diskretisierung von (4) berechnet werden.

Es wurden Berechnungen für verschiedene Schwingeranordnungen und Schallfeldgeometrien durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, daß die Geometrie der Meßstrecke wesentlichen Einfluß auf das empfangene Doppler-Frequenzspektrum hat, wenn die Anordnung so gewählt wird, daß das Zentrum des Meßvolumens stets in der Rohrachse liegt. Bild 6 zeigt normierte Spektren für verschiedene Positionen der Schwinger auf dem Rohrumfang. Die Veränderung der Mittenfrequenz mit der Schwingeranordnung resultiert hier ausschließlich aus der Gestalt des Schnittbereiches, der bei gegenüberliegenden Wandlern ($\varphi_0 = 90°$) ein minimales Volumen einnimmt.

Ähnliche Berechnungen wurden für variable Einstrahlwinkel durchgeführt, wobei zu beachten ist, daß im Clamp-on-Betrieb diese Winkel nur im Bereich zwischen 90° und dem Grenzwinkel der Totalreflexion an der Grenzschicht Gefäßwand-Fluid liegen dürfen.

Erste Messungen mit einer Anordnung nach Bild 7 konnten die theoretisch ermittelten Zusammenhänge, insbesondere den Einfluß des Lagewinkels auf die Mittenfrequenz des Spektrums, qualitativ bestätigen.

Als Ergebnis der Rechnersimulation kann neben dem Spektrum noch ein Korrekturfaktor berechnet werden, der den Zusammenhang zwischen der Mittenfrequenz des Spektrums f_m und der Frequenz der mittleren Strömungsgeschwindigkeit f_{vm} bestimmt.

$$f_{vm} = k \cdot f_m \tag{5}$$

Für Meßvolumen im Zentrum des durchströmten Rohres weisen die Faktoren k für laminare und turbulente Strömungen erhebliche Unterschiede auf, was die Berechnungen in [5] bestätigen.

Zusammenfassung

Das akustische Doppler-Strömungsmeßverfahren liefert Frequenzspektren, die vom Strömungsprofil und von der Lage und Größe des Meßvolumens abhängig sind. Um die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über den Querschnitt und damit den Durchfluß zu bestimmen, muß aus dem Doppler-Spektrum eine dafür charakteristische Frequenz ermittelt werden. Entsprechende Simulationsrechnungen lieferten Doppler-Spektren, mit deren Hilfe die starken Einflüsse der Meßstreckengeometrie auf das spektrale 1. Moment verdeutlicht werden. Damit wird neben der Notwendigkeit einer rauscharmen Signalgewinnung und der entsprechenden Frequenzauswertung die Forderung nach einer definierten Position des Meßvolumens unterstrichen, um weitgehend unabhängig vom Strömungsprofil den Durchfluß messen zu können.

Literatur

[1] Magistri, S. G.: Spektralanalyse von Ultraschall-Dopplersignalen zur Bestimmung turbulenzsensitiver Strömungsparameter in Blutgefäßen. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich 1982.
[2] Grossmann, H.; Klemenz, A.: Impuls-Doppler-Verfahren zur Erfassung von Blutflußparametern. KTB Ultraschalldiagnostik 1977, Teil 2. Martin-Luther-Universität Halle/Wittenberg. S. 23—28.
[3] Siemens AG. Gerät zum Erfassen der Geschwindigkeit strömender Medien. DE — 052319 724 (1973).
[4] US Patent 4413531.
[5] Fiedler, O.: Volumenströme und Strömungsgeschwindigkeit turbulenter Strömungen in Rohren verschiedener Rauhheit. Wiss. Zeitschr. d. WPU Rostock 34 (1985) 3, S. 54—57. msr 8818

(Fortsetzung von Seite 228)

[9] Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full. International Standard ISO 5167.
[10] Mengenstrommessung in vollständig gefüllten Rohrstrecken mittels Meßblenden, Meßdüsen und Venturidüsen — Technische Bedingungen, Konstruktionsrichtlinien, Berechnungen. DDR-Standard TGL 43 549, Entwurf Dez. 1985.
[11] Elsner, N.; Fischer, S.; Klinger, J.: Thermophysikalische Stoffeigenschaften von Wasser (Wasserdampftafeln). Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1982.
[12] Richtlinie zur rechnerischen Bestimmung der Kompressibilitätszahlen und Normdichte von Erdgas sowie zur Abschätzung ihrer Unsicherheiten und ihrer Fehlereinflüsse auf die Volumenmessung und die -umwerteverfahren. Ilmenau: ASMW-Fachabteilung Thermodynamik, FG Dichte/Viskosität, 1982. msr 8819

Zu Ihrer Information! Im VEB Verlag Technik Berlin erscheinen neben der „msr" folgende Fachzeitschriften der Elektrotechnik/Elektronik und angrenzender Gebiete:

Nachrichtentechnik/Elektronik; radio-fernsehen-elektronik; Elektropraktiker und Mikroprozessortechnik.

Bitte nutzen Sie auch diese Informationsquellen!

Entscheidungspraxis. Ziele, Verfahren, Konsequenzen. Von E. MUSCHIK und P. H. MÜLLER. Berlin: VEB Verlag Technik 1986. 142 Seiten, 45 Bilder, 42 Tafeln, 20,— M. Bestell-Nr.: 553 614 0

Das Buch beschäftigt sich mit der Ermittlung optimaler Entscheidungen bei Ungewißheit, wobei das Ziel darin besteht, „eine fundierte und dabei durchschaubare Darstellung der Entscheidungsproblematik in möglichst vielseitigen Aspekten zu geben". Hierfür werden in 13 Kapiteln die Ziele und Verfahren der ingenieurtechnischen Entscheidungspraxis sowie die möglichen Konsequenzen der Entscheidungen betrachtet. Die einzelnen Kapitel lassen sich in drei Gruppen zusammenfassen:

1. Beschreibungsformen von Entscheidungssituationen (Kapitel 2, 6, 8 bis 11)
2. Entscheidungskriterien (Kapitel 3 bis 5, 7)
3. Entwicklungsrichtungen (Kapitel 12, 13).

In der ersten Gruppe werden die formale Grundstruktur einer jeden Entscheidung, die quantitativen Eigenschaften einer Entscheidungssituation, subjektiv festlegbare Parameter, Entscheidungsvarianten, Umweltzustände, Entscheidungsfehler, Nutzwerte von Entscheidungsvarianten und die verschiedenen Formen des Risikos behandelt.

In der zweiten Gruppe erfolgt eine Beschreibung der verschiedenen Entscheidungskriterien und die Untersuchung der Beziehungen zwischen ihnen. Bei den klassischen Entscheidungskriterien werden dabei das Minimax-, das Bayes-, das Laplace-, das Savage- und das erweiterte Minimax-Kriterium betrachtet, während bei den abgeleiteten Entscheidungskriterien das Hurwicz-, das Hodges-, das Lehmann-, das Germeier- und das Produkt-Kriterium behandelt werden. Außerdem wird ein besonders flexibles Entscheidungskriterium vorgestellt, daß sich an die Datenqualität und die Wiederholungszahl der Entscheidungen sowie die Risikobereitschaft des Entscheidenden anpaßt.

In der dritten Gruppe werden dann mehrzielorientierte Entscheidungen und sogenannte alternative Methoden, wie die kriterielle Analyse und die Methode der unscharfen Mengen, kurz erläutert.

Das Buch wendet sich vor allem an Ingenieure und Ökonomen, die sich mit Entscheidungen bei Ungewißheit beschäftigen. Es gibt einen guten Überblick über die Beschreibungsformen einer Entscheidungssituation und die verschiedenen Kriterien für die Entscheidungsfindung. Wegen des breiten Spektrums der betrachteten Problemstellungen und der anschaulichen Beispiele ist das Buch eine wertvolle Informationsquelle für den interessierten Leser.

B 2304 G. BRETTHAUER

Lexikon und Wörterbuch der industriellen Meßtechnik. 2. Auflage. Herausgeber: P. PROFOS. Essen: Vulkan-Verlag 1986. 417 Seiten.

Dieses Fachlexikon enthält etwa 1600 Stichwörter einschließlich ihres englischen und französischen Äquivalents. Mit dem im Anhang befindlichen englisch-deutschen und französisch-deutschen Register bildet diese Publikation gleichzeitig ein dreisprachiges Fachwörterbuch. Der ausgewählte Fundus an Stichwörtern wird dem auf industrielle Meßtechnik orientierten Titel vollauf gerecht. Er berücksichtigt die Gebiete Elektrotechnik, Optik, Strömungstechnik, chemische Verfahrenstechnik, Mechanik, Akustik, Materialprüfung, Bau- und Wärmetechnik. Die Begriffe betreffen Meßprinzipien, Meßwerke und konstruktive Meßgerätevarianten. Dabei wird die Meßtechnik nicht als separate Disziplin, sondern als integrierender Bestandteil des Betriebes und der Automatisierung von Aggregaten und Prozessen aufgefaßt, wie sich an Stichwörtern zeigt, die primär z. B. der Regelungs- und Steuerungstechnik oder der digitalen Informationsverarbeitung zuzuordnen sind, heute aber zum unverzichtbaren Vokabular des Meßtechnikers gehören. Auch wird das Meßgerät im Zusammenhang mit der Meßtheorie gesehen, weshalb z. B. der Ausgleichsrechnung und der mathematischen Statistik zuzurechnende Begriffe erscheinen, die ebenfalls als Termini moderner industrieller Meßtechnik anzusehen sind. Durch die Aufnahme einer Reihe von Begriffen zur Beschreibung dynamischer Systeme im Zeit- und Frequenzbereich wird der Sachverhalt dokumentiert, daß jedes Meßgerät für sich bereits ein dynamisches System verkörpert und auch unter diesem Blickwinkel zu sehen und einzusetzen ist.

Die Publikation unterstützt die immer noch verbesserungsbedürftige interdisziplinäre Kommunikation auf dem Gebiet der modernen Prozeßautomatisierung und ist als Lexikon wie als Wörterbuch sehr zu begrüßen. Sie bildet für Meßtechniker, Automatisierungsingenieure, Prozeßrechentechniker und Verfahrenstechniker in Ausbildung und Beruf sowie für technische Übersetzer dieser Fachgebiete ein wertvolles Nachschlagewerk.

B 2219 H. RUDOLPH

Mit dem Computer messen und oszilloskopieren. Messungen mit dem Z-80 — einfach ausgewertet und verarbeitet. Von H. JOAS. München: Franzis-Verlag GmbH 1987. 136 Seiten, 36 Bilder, 25 Tafeln.

Der (Hobby-)Elektroniker (und nicht nur dieser) ist daran interessiert, den ihm zur Verfügung stehenden Computer auch als vielseitiges Meßgerät zu nutzen. Einige interessante Möglichkeiten dazu werden in diesem Buch vorgestellt.

Dabei ist es schon erstaunlich, welche Aufgaben selbst mit kleinsten Systemen, und um ein solches handelt es sich in diesem Fall (ZX 81), realisiert werden können. Die Lösungen sind allerdings nicht auf diesen Rechner beschränkt, sondern lassen sich auf alle BASIC-programmierbaren Rechner auf Z-80-Basis übertragen. In didaktisch geschickter und zugleich systematischer Weise führt der Autor in die meßtechnischen Möglichkeiten des Heimcomputers ein. Die unkomplizierte und gut lesbare Darstellung dürfte einen großen Leserkreis ansprechen.

Da der Hardwareaufwand durch begrüßenswerte Bevorzugung von Softwarelösungen gering gehalten wurde, können die Meßvarianten nach kurzer Bauzeit am Rechner erprobt werden.

Nach der Beschreibung der erforderlichen Parallelschnittstelle (Z-80-PIO) und deren Programmierung werden Meßmethoden für die grundlegenden Meßgrößen — Zeit, Frequenz, Spannung —, ihre Hardware sowie die zugehörigen Assembler- und BASIC-Programme erläutert. BASIC-Kenntnisse werden dabei schon vorausgesetzt, die Assemblerprogramme werden jedoch ausführlich und für die Anwendungen hinreichend beschrieben. Diese Programme bilden die Grundlagen für die nachfolgend behandelte Messung der elektrischen Größen Widerstand und Kapazität sowie der nicht elektrischen Größen Temperatur, Druck und magnetische Flußdichte.

Eine weitere sehr interessante Anwendung ist die Signalerfassung, -speicherung und die Darstellung auf dem Bildschirm. Die Signalspeicherung mit variabler Speichertiefe und typische Oszilloskopfunktionen, wie Triggerung, Wahl der Zeitbasis und Ermittelung der Signalfrequenz werden mit Maschinenprogrammen realisiert, die auch hier wieder ausführlich und klar beschrieben werden. Die Programmodule werden durch ein BASIC-Programm gesteuert, das die Signaldarstellung mit normaler oder hochauflösender Grafik, Eingabe der Triggerparameter und Zeitbasis sowie Berechnung und Einblendung der Signalfrequenz ermöglicht.

Mit den Hardware- und Softwarezusätzen wird der Homecomputer zu einem kleinen Meßwerterfassungssystem und zum Oszilloskop für langsamere Vorgänge, eine Möglichkeit, die bei einem breiten Leserkreis auf Interesse stoßen wird. Der gute Gesamteindruck dieses Taschenbuches wird durch die hohe drucktechnische Qualität noch verstärkt.

B 2285 J. WEDE

Verehrte Leser!

Sicher werden Sie überrascht gewesen sein, als Sie dieses Heft aufgeschlagen haben. Zumindest unsere langjährigen Stammleser werden sofort bemerkt haben, daß die vorliegende Ausgabe der msr ein optisch neues Bild liefert. Was ist geschehen? Viele von Ihnen werden wissen, daß sich in der polygrafischen Industrie überall in der Welt, natürlich auch in unserem Lande, wesentliche Veränderungen vollzogen haben und vollziehen. Wie in allen Wirtschaftsbranchen geht es auch in der Polygraphie darum, die arteigenen Produkte ökonomischer, mit verbesserter Qualität und den wachsenden Ansprüchen der Konsumenten angepaßt zu produzieren. Und da der technische Fortschritt die Polygraphie nicht ausklammert, wurden und werden neue Satz- und Druckverfahren wie auch Technologien der buchbinderischen Weiterverarbeitung eingeführt. Der Hand- oder Bleisatz und der Buch- oder Hochdruck im Gutenbergschen Sinne wurden im Laufe der Entwicklung für viele Anwendungsfälle durch Einzel- oder Zeilengußmaschinensatz bzw. Tiefdruck oder Offsetdruck ersetzt. Dank des enormen technischen, insbesondere rechentechnischen Aufschwungs unserer Tage ist für eine ganze Reihe von Druckerzeugnissen, darunter Zeitungen und Zeitschriften, heute der computergesteuerte Lichtsatz oder Fotosatz im Verein mit dem Offsetdruck die favorisierte Herstellungstechnologie. Unter diesem Blickwinkel war es für Außenstehende schon ein wenig unverständlich, daß die msr, eine inhaltlich auf Schlüssel- oder Hochtechnologien orientierte Zeitschrift, bisher an den Vorzügen dieser modernen Satz- und Drucktechniken nicht partizipieren konnte. Natürlich gab es dafür Gründe — sowohl fachliche als auch administrative. Einer davon ist beispielsweise der relativ hohe mathematische Formelanteil unserer Zeitschrift, den zu setzen (und übrigens auch zu korrigieren!) in Blei bisher einfacher war. Andererseits wurde der Bleisatz immer problematischer. In der polygrafischen Industrie der DDR besteht seit längerer Zeit die Orientierung, generell den Bleisatz durch Foto- oder Lichtsatz abzulösen. Davon ist natürlich auch unsere Druckerei „Thomas Müntzer" in Bad Langensalza betroffen. Entsprechend wurde die auslaufende Technologie Bleisatz seit Jahren nur noch „am Leben erhalten", Erneuerungsmaßnahmen kaum noch durchgeführt. So hatten wir beispielsweise keine Möglichkeit, unsere Schrift, die bei dem vor Jahren notwendig gewordenen Kompreßsatz nicht sehr lesefreundlich war, gegen eine andere auszutauschen.

Als sich Anfang dieses Jahres die Druckerei an Verlag und Redaktion mit der Frage wandte, ob wir bereit wären, die Umstellung der msr auf Lichtsatz und Offsetdruck mitzugehen, standen wir zunächst vor einem Problem. Es ist an und für sich üblich und ungeschriebenes Gesetz, derartige Veränderungen am Bild der Zeitschrift nur zu Beginn eines neuen Kalenderjahres, also mit einem neuen Jahrgang, durchzuführen. Diese Regel soll auch gar nicht in Frage gestellt werden. Trotzdem entschlossen wir uns nach kurzem Nachdenken, dem Wunsch der Druckerei zu entsprechen, weil wir überzeugt sind, daß die Vorteile, die sich aus dieser Maßnahme ergeben, hinreichend groß sind, um sich einmal über „Übliches" hinwegzusetzen.

Welches sind nun tatsächlich die wesentlichen Neuerungen?

1. Wir verwenden eine andere, lesefreundlichere Schrift als bisher.
2. Wir vergrößern den Schriftgrad und parallel dazu den Satzspiegel, so daß etwa die gleiche „Informationsmenge" ins Heft paßt, obwohl auch durch diese Maßnahme die Lesbarkeit sichtbar steigt.
3. In Abstimmung mit unserer Herstellungsabteilung haben wir in der Gestaltung des Heftes einige Veränderungen (Inhaltsverzeichnis, Beitragsüberschriften, Verzicht auf Spaltenlinien u. a.) vorgenommen, die insgesamt zu einem optisch gefälligeren Bild führen sollen.
4. Vom Offsetdruck versprechen wir uns eine erheblich bessere Wiedergabe von Halbtonbildern.

Dies mag zunächst genügen, um Sie davon zu überzeugen, daß unsere Umstellung sinnvoll ist.

Da sich aus den Neuerungen natürlich auch einige Konsequenzen für die Manuskriptgestaltung und damit für unsere Autoren ergeben, finden Sie auf der nächsten Seite leicht korrigierte, den Veränderungen angepaßte Manuskripthinweise.

Wir wünschen Ihnen, verehrte Leser, Freude an der Lektüre der msr und hoffen, daß sie Ihnen viele fachliche Informationen und Anregungen in gefälliger äußerer Aufmachung bietet.

Dr.-Ing. DIETRICH WERNER
Verantwortlicher Redakteur

In eigener Sache

Wir suchen einen Fachredakteur für unsere Zeitschrift, der in oder bei Berlin über Wohnraum verfügt. Er sollte ein abgeschlossenes Hochschulstudium in der Fachrichtung Technische Kybernetik/Automatisierungstechnik oder in einem angrenzenden Gebiet (z. B. Technische Informatik oder Elektrotechnik/Elektronik) und gute Kenntnisse der deutschen Sprache haben.

Seine Aufgaben umfassen:
— redaktionelle und fachliche Bearbeitung von Manuskripten
— Besuch und Auswertung von Fachtagungen, -messen und -ausstellungen
— fachbezogene journalistische Tätigkeit.

Interessenten wenden sich bitte an:

VEB Verlag Technik
Oranienburger Str. 13/14
Berlin
1020

Redaktion „messen · steuern · regeln"
Tel.: 2 87 03 62
2 87 03 74

Manuskripthinweise

Die Redaktion msr ist bemüht, eingereichte und geeignete Beiträge möglichst fehlerfrei und ohne zusätzliche Verzögerung zu veröffentlichen. Eine Voraussetzung dafür ist, daß unsere Autoren die folgenden Manuskripthinweise einhalten.

Abnahme

Der Autor erklärt sich mit den Abnahmebedingungen (siehe Impressum jedes Heftes) einverstanden. Er übernimmt die Verantwortung dafür, daß die dargelegten Aussagen zur Veröffentlichung freigegeben und fachlich korrekt sind. (Freigabeerklärung durch den Betrieb oder die Institution ist generell beizufügen!) Eingereichte Manuskripte werden vor der Abnahme von Spezialisten des betreffenden Fachgebietes begutachtet.

Umfang und Form

msr glieder sich in einen Aufsatzteil (Zweispaltensatz) und einen Rubrikenteil (Dreispaltensatz). Beiträge für den Aufsatzteil sollten nicht mehr als 12 Schreibmaschinenseiten (zweizeilig, 30 Zeilen mit 60 Anschlägen) umfassen. Kurzbeiträge (verkürzte Bearbeitungsfrist!) sind auf 3 Schreibmaschinenseiten und 2 bis 3 Bilder oder Tafeln zu begrenzen. Das Manuskript ist der Redaktion in zweifacher Ausfertigung (Original und Kopie von Text-, Bild- und Tafelvorlagen) in einer aus der Sicht des Autors *druckreifen Form* zu übergeben.

Inhalt

Eine allgemeinverständliche verbale Einleitung, die Anliegen und grundsätzliche Aufgabenstellung des Beitrags erläutert, soll einem breiten Leserkreis einen Anreiz zum Weiterlesen bieten. Eine informative Zusammenfassung am Ende des Beitrags soll markante Ergebnisse und einen Ausblick auf anknüpfende Aufgaben und Probleme sowie weitere Entwicklungen geben.

Der Autor sollte sich um Anwendungsbezogenheit bemühen und theoretische Erkenntnisse an praktischen bzw. praxisrelevanten Beispielen demonstrieren.

Text

Der unpersönlich abgefaßte Text (ohne „wir", „ich" usw.) soll möglichst wenige allgemeinsprachliche Abkürzungen enthalten (nur gemäß Duden). Fachspezifische Abkürzungen sind zu erläutern. Ganze Worte in Großbuchstaben sind nur bei in dieser Form eingeführten Begriffen (z. B. BASIC, PASCAL usw.) zu verwenden. (Gilt auch für Bilder!)

Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit ist der Beitrag nach dem Dezimalsystem, beginnend mit **0. Einleitung** zu gliedern, wobei die Gliederungspunkte mit kurzen und prägnanten Überschriften zu versehen sind. Die **Zusammenfassung** wird nicht numeriert.

Deutlich ist zwischen den Buchstaben und Ziffern o, O, 0 und 1, I, l zu unterscheiden. Mit einem Textverarbeitungssystem erstellte Manuskripte können nur abgenommen werden, wenn der Zeichensatz dem vollständigen deutschen Alphabet entspricht („ß", Umlaute).

Gleichungen

Gleichungen sollten möglichst TGL-gerecht geschrieben werden (TGL 29447, TGL 6710/01). Symbole und spezielle Zeichen (Indizes, Exponenten, geschweifte Klammern usw.) sind sorgfältig anzugeben (auch im Text). Griechische Buchstaben (Schreibweise siehe Duden) oder andere Zeichen, die zu Verwechslungen Anlaß geben, können mit Bleistift in Doppelklammern ((. . .)) erläutert werden. Vektoren (Kleinbuchstaben), Matrizen und Mengen (Großbuchstaben) sind schwarz zu unterstreichen, sie werden halbfett gedruckt. Gleichungen werden in der Reihenfolge des Auftretens mit einer Nummer versehen, die rechts in runden Klammern anzugeben ist. Der Bezug auf eine Gleichung im Text erfolgt nur durch die Angabe der Nummer in runden Klammern, ohne Zusätze wie Gleichung, Glg., Formel oder ähnliches.

Bilder

Bilder lockern den Text auf und sollen deshalb in einer angemessenen Relation zum Text stehen. In der msr wird durchgängig der Begriff Bild verwendet. Bilder werden dem Text entsprechend fortlaufend numeriert. Die Textstelle, an der das Bild erwähnt wird bzw. wo es eingeordnet werden soll, wird auf dem linken Rand mit der Bildnummer (z. B. B. 1 für Bild 1) gekennzeichnet. **Bildunterschriften** werden auf einem gesonderten Blatt zusammengestellt. Bilder sind vom Text getrennt beizufügen. Strichzeichnungen müssen klar, sauber und mit hohem Kontrast ausgeführt sein. (Einschlägige Vorschriften, Fachstandards, TGL beachten!) Alle Vorlagen werden nochmals umgezeichnet, deshalb genügen Bleistiftskizzen. Bitte keine Farbstifte verwenden! Rechnerausdrucke (Programmauszüge, Listen, Grafik), die als Original verwendet werden sollen, sind auf weißem Papier herzustellen (auf sauberes Druckbild achten!). Bei der Bildgestaltung ist zu berücksichtigen, daß Bilder in der Regel auf 9,0 cm Bildbreite (weitere Vorzugsmaße 5,9 cm, 12,2 cm, 18,5 cm) verkleinert werden. Bei Bildern mit sehr hohem Textanteil ist die Darstellung als Tafel zu erwägen. Fotos (Halbtonbilder) müssen in reproduzierbarer Form (ausschließlich schwarz/weiß) vorliegen.

Tafeln

Tafeln werden ebenfalls mit fortlaufender Numerierung vom Manuskript getrennt beigefügt. Jede Tafel wird mit einer **Tafelüberschrift** versehen (z. B. **Tafel 1.** . . .). Wie bei Bildern ist im Text auf die Tafel hinzuweisen, auf dem linken Rand wird z. B. T. 1 (für Tafel 1) angegeben.

Literatur

Auch die Literaturverweise werden im Text fortlaufend gekennzeichnet. Die Numerierung erfolgt in eckigen Klammern, z. B. [1]; [1] [5] und [9]; [1] bis [4]. Die Literaturhinweise werden auf einem Extrablatt entsprechend folgenden Beispielen zusammengestellt:

Literatur

[1] SCHULZ, P.; MÜLLER, B.: Kontinuierliche Temperaturüberwachung in Stahlschmelzen. msr, Berlin 30 (1987) 3, S. 98—102.

[2] TÖPFER, H.; BESCH, P.: Grundlagen der Automatisierungstechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1987.

Bei Literatur in kyrillischer Schrift sind Autor und Originaltitel zu transliterieren (siehe Duden). Bei fremdsprachigen Titeln (außer englischen) ist zusätzlich die deutsche Übersetzung in Klammern zu setzen.

Autorenkurzvorstellung

Dem Beitrag ist eine Kurzvorstellung des Autors mit den Angaben: Titel, Vorname, Name, Alter (Geburtsdatum), Studium (Fachrichtung, Bildungseinrichtung, Zeitraum), weitere Qualifikationen (Promotion o. ä. mit Datum), Arbeitsstellen, jetzige Dienststellung beizulegen.

Fußnoten

Fußnoten werden im Text fortlaufend numeriert (z. B. . . .[1]) und auf einem Extrablatt zusammengefaßt.

Kurzfassung

Für Beiträge des Aufsatzteils ist eine etwa 8zeilige Zusammenfassung für den Inhaltsstreifen erforderlich.

Weitere Bearbeitung

Das redaktionell bearbeitete Manuskript wird bei Bedarf neu geschrieben. Der Autor erhält eine Kopie dieser Umschrift und Xerokopien der Strichzeichnungen zugeschickt. Korrekturen und geringfügige Änderungen (nur jetzt noch möglich) sind mit Farbstift einzutragen und das Manuskript ist bis zum angegebenen Termin an die Redaktion zu senden. Von den Beiträgen des Aufsatzteils erhält der Autor zwei Druckfahnen, von denen eine korrigiert *schnellstmöglich* der Redaktion msr (VEB Verlag Technik Berlin) zuzuleiten ist.

Telefonische Vorabmitteilung der Korrekturen ist erwünscht!

Der Autor erhält von seinem Beitrag im Aufsatzteil (unverbindlich!) kostenlos je nach Umfang der Arbeit 10 bis 20 Fortdrucke sowie ein Belegexemplar des entsprechenden Heftes der msr.

Kurzfassungen

FIEDLER, O.:

Strömungs- und Durchflußmeßtechnik

msr, Berlin 31 (1988) 5, S. 194—204

Prinzipien und gegenwärtiger Stand der Strömungs- und Durchflußmeßtechnik, vorzugsweise eingriffsfreier Verfahren, werden an Beispielen erläutert. Das betrifft magnetisch induktive, akustische, thermische und optische Methoden. Ihre Bewertung erfolgt nach Gesichtspunkten der Anwendung in der industriellen Meßtechnik und in der Forschung verschiedener Disziplinen. Die Leistungsfähigkeit der Geräte hängt wesentlich vom Stand und von der Integration der Elektronik in den Wandlersystemen ab.

GÄTKE, J.:

Akustische Strömungsgeschwindigkeits- und Durchflußmessung

msr, Berlin 31 (1988) 5, S. 212—217

Es werden Aussagen zum Stand der akustischen Strömungs- und Durchflußmeßtechnik gemacht.
Neben den Varianten in den Verfahren werden besonders die Einflüsse verschiedener Parameter diskutiert.
Abschließend werden Ergebnisse eigener Entwicklungen und Geräteausführungen vorgestellt. Eine ausgewählte Literaturzusammenstellung verweist auf spezielle Angaben.

SCHLÜTER, H.:

Synchronisierte Kurzzeitintegration phasenempfindlich gleichgerichteter Signale

msr, Berlin 31 (1988) 5, S. 217—221

Am Beispiel eines induktiven Strömungsmessers werden Eigenschaften einer Kombination aus phasenempfindlichem Gleichrichter und Kurzzeitintegrator (taktsynchron arbeitend) beschrieben. Eine Analyse der Verarbeitung von Nutz- und Störsignalen zeigt prinzipielle Vorteile der synchronen Kurzzeitintegration gegenüber der Tiefpaßfilterung 1. Ordnung bei der Unterdrückung von taktkorrelierten Störsignalen und hinsichtlich der erreichbaren Grenzfrequenz des Meßsystems. Hiermit wird die Zweckmäßigkeit des Einsatzes integrierender AD-Umsetzer für die Verarbeitung phasenempfindlich gleichgerichteter Signale begründet.

URNER, G.:

Korrelationsdurchflußmessung, ein Meßverfahren für schwierige Fluide

msr, Berlin 31 (1988) 5, S. 221—224

Das Korrelationsdurchflußmeßverfahren ist ein modernes Meßverfahren und gehört zu den Laufzeitverfahren. Es ist besonders zur Messung schwieriger Fluide, wie Mehrphasengemische, Staubtransport und stark verschmutzte Flüssigkeiten, geeignet. Die Auswahl der Sensoren zur Detektion der natürlichen Inhomogenitäten im Fluid ist von entscheidendem Einfluß auf die Meßfehler. Auf der Basis des MC 80 wird ein Polaritätskorrelator vorgestellt. Die Probleme des Meßverfahrens werden an einigen typischen Meßergebnissen diskutiert.

GEHLHAAR, H.:

Durchflußmessungen nach Differenzdruckverfahren

msr, Berlin 31 (1988) 5, S. 224—228

In einer Übersicht zur Durchflußbestimmung über die Meßgröße Differenzdruck wird kurz die Gegenüberstellung von Staudruck- und Wirkdruckverfahren vorgenommen. Danach wird ausführlicher über den DDR-Standard TGL 43 549 zur Wirkdruckdurchflußmessung informiert.
Es wird besonders auf die jetzt möglichen geringeren Meßunsicherheiten und auf die neuen Berechnungsgleichungen hingewiesen.

SCHILDER, K.:

Wirbel-Durchflußmesser für die Automatisierungstechnik

msr, Berlin 31 (1988) 5, S. 228—231

Der Wirbel-Durchflußmesser ursaflux W 3 mit den Typenreihen sowie der mikroprozessorgestützte Durchflußrechner ursaflux PR wird als neue Durchflußmessergeneration für die sichere und wirtschaftliche Messung von Gas- und Flüssigkeitsströmen in Rohrleitungen vorgestellt.
Das robuste Aufnehmersystem ohne bewegliche Teile mit dem piezoelektrischen Sensor ermöglicht eine betriebssichere und genaue Erfassung der Durchflußmengen. Es werden der Aufbau, die Funktion und die technischen Daten der Geräte beschrieben. Als Beispiel wird eine Gasmessung mit einer Wirbel-Durchflußmeßeinrichtung einschließlich Mikrorechnerumwertung dargestellt.

Резюме

FIEDLER, O.:

Техника измерения и расхода

msr, Berlin 31 (1988) 5, стр. 194—204

На примерах пояснены принципы и настоящее состояние техники измерения течений и расхода, предпочтительно методы, свободные от прерывания. Это касается магнитно индуктивных, акустических, термических и оптических методов. Их оценка производится по точкам зрения применения в области промышленной техники измерения и исследований разных дисциплин. Производительность приборов в значительной мере зависит от состояния и интеграции электроники в системы преобразователей.

GÄTKE, J.:

Акустическое измерение расхода и скорости течения

msr, Berlin 31 (1988) 5, стр. 212—217

Даны высказывания по состоянию акустической техники измерения течения и расхода. Кроме вариантов в методах, в частности обсуждены влияния различных параметров. В конце статьи представлены результаты собственных разработок и исполнений приборов. В перечне выбранной литературы указаны специальные данные.

SCHLÜTER, H.:

Синхронная кратковременная интеграция выпрямленных фазочуствительных сигналов

msr, Berlin 31 (3988) 5, стр. 217—221

На примере индуктивного расходомера описаны свойства комбинации фазочувствительного выпрямителя с кратковременным интегратором (работающим по синхронному такту). Анализ обработки полезных сигналов и сигналов помех показывает принципиальные преимущества синхронной кратковременной интеграции по сравнению с фильтрацией нижних частот первого порядка при подавлении тактокорреляционных сигналов помех, а также относительно достигаемой предельной частоты измерительной системы. Тем самым обозновывается целесообразность применения интегрирующих а/ц-преобразователей для обработки фазочувствительных выпрямленных сигналов.

URNER, G.:

Корреляционное измерение расхода — метод измерения для сложных жидкостей

msr, Berlin 31 (1988) 5, стр. 221—224

Корреляционный метод измерения расхода является современным методом измерения и принадлежит к методам времени прогона. В частности, он пригоден для измерения сложных жидкостей, таких как многофазных смесей, для транспортирования пыли и сильно загрязенных жидкостей. Выбор датчиков для детекции естественных неоднородностей в жидкости имеет решающее влияние на погрешности измерения. На основе МС-80 представлен коррелятор полярности. Проблемы измериельного метода обсуждены на ряде типичных результатов измерения.

GELHAAR, H.:

Измерение расхода по методам разности давления

msr, Berlin 31 (1988) 5, стр. 224—228

В обзоре для определения расхода об измеряемой величине разности давления дано краткое сопоставление методов динамического давления и активного давления. Затем подробно информируют о стандарте ГДР ТГЛ 43549 по измерению расхода активного давления. В частности, указывают на возможные теперь незначительные неточности измерения и новые уравнения расчета.

SCHILDER, K.:

Измерители вихревого течения для техники автоматизации

msr, Berlin 31 (1988) 5, стр. 228—231

Вихревой расходомер УРСАФЛЮКС W 3 с типовыми рядами, а также вычислитель расхода с применением микропроцессора УРСАФЛЮКС PR представлены как новое поколение расходомеров для надежного и экономичного измерения газовых и жидкостных потоков в трубопроводах. Солидная система датчиков без движущихся деталей с пьезоэлектрическим сенсором делает возможным надежны и точный сбор количеств расхода. Описаны структура, функция и технические данные приборов. Как пример представлено измерение газа с помощью вихревого расходомера включая расчет на микровычислителе.

Summaries

FIEDLER, O.:

Principles of Flow Measurement

msr, Berlin 31 (1988) 5, pp. 194—204

By means of examples, the author explains the principles and the state of the art of flow measurement prefering non-contacting methods, i.e. inductive, acoustical, thermal and optical ones. They are estimated according to viewpoints of application in industrial measurement and research of different fields. The performance of the devices essentially depends on the state of electronics and its integration into the transducer systems.

GÄTKE, J.:

Acoustical Measurement of Flow and Flow Speed

msr, Berlin 31 (1988) 5, pp. 212—217

The author outlines the state of acoustical flow measurement. Besides the variants of the methods he discusses in particular the influence of certain parameters. Finally, he presents results of own developments and constructions of devices. A selected literature overview points out special information.

SCHLÜTER, H.:

Synchronized Short-Time Integration of Phase-Sensitive Rectified Signals

msr, Berlin 31 (1988) 5, pp. 217—221

By means of the examples of an inductive flowmeter, the author describes the characteristics of a device consisting of a phase-sensitive rectifier and a short-time integrator working synchronously with the clock. An analysis of the processing of useful and perturbation signals shows the basic advantages of the synchronous short-time integration by contrast with the filtering by first-order low-pass filters with the supression of clock-correlated perturbation signals as well as with regard to the obtainable limit frequency of the measuring system. Thus, the usefulness of applying integrating A/D converters for processing phase-sensitive rectified signals is proved.

URNER, G.:

Correlation Flow Measurement — a Method of Complex Fluids

msr, Bersin 31 (1988) 5, pp. 221—224

The correlation flow measurement method is a modern measuring method belonging to the delay-time methods and being particularly suited to the measurement of complex fluids such as multiphase mixtures, dust transport and highly contaminated liquids. The selection of the sensors for detecting the natural inhomogeneities contained in the fluid has an essential influence on the measurement errors. The author presents a polarity correlator based on the MC 80 and discusses problems of the measuring method by means of some typical measurement results.

GEHLHAAR, H.:

Flow Measurement by Differential Pressure Methods

msr, Berlin 31 (1988) 5, pp. 224—228

In a survey on flow rate determination via the measured differential pressure the author briefly contrasts dynamic pressure and differential presssure methods. He informs in detail about the GDR standard TGL 43549 concerning flow measurement based on differential pressure. The measurement uncertainties reduced now and the new calculation equations are pointed out in particular.

SCHILDER, K.:

Turbulence Flowmeters for Automation

msr, Berlin 31 (1988) 5, pp. 228—231

The author presents the turbulence flowmeter ursaflux W 3 and its models as well as the microprocessor-supported flowcomputer PR as a new flowmeter generation for safe and economic measurement of gas and liquid flows in pipes. The robust pick-up system without moved parts based on the piezoelectric sensor allows a reliable and precise acquisition of the flow rate. The author describes construction, function and technical data of the apparates. As an example, he presents a gas measurement by a turbulence flow measuring device including evaluation by microcomputer.

Résumés

FIEDLER, O.:

Principes de la mesure d'écoulements et de débit

msr, Berlin 31 (1988) 5, pp. 194—204

A l'aide d'exemples, l'auteur explique les principes et l'état présent de la mesure d'écoulements et de débit, de préférence les méthodes sans contact, c'est-à-dire les principes inductif, acoustique, thermique et optique. Ils sont estimé selon les points de vue de l'emploi dans la technique de mesure industrielle et dans la recherche de domaines différents. La performance des dispositifs dépend essentiellement de l'état de l'électronique et de son intégration dans les systèmes de transducteur.

GÄTKE, J.:

Mesure acoustique de la vitesse d'écoulements et du débit

msr, Berlin 31 (1988) 5, pp. 212—217

L'auteur explique l'état de la mesure acoustique d'écoulements et de débit. Outre les variantes des méthodes, il discute particulièrement les influences de certaines paramètres. Finalement, il présente des résultats des développements et constructions propres d'appareils. Un aperçu choisi donne des informations spéciales.

SCHLÜTER, H.:

Intégration à court terme synchronisée des signaux redressés sensibles à la phase

msr, Berlin 31 (1988) 5, pp. 217—221

A l'aide de l'exemple d'un débitmètre inductif, l'auteur décrit les caractéristiques d'un dispositif contenant un redresseur sensible à la phase et un intégrateur à court terme travaillant d'une manière synchrone avec le rythme. Une analyse du traitement des signaux utile et perturbateur montre les avantages fondamentaux de l'intégration à court terme synchrone par rapport au filtrage par filtre passe-bas du premier ordre avec suppression des signaux perturbateurs corrélés avec le rythme et par rapport à la fréquence limite obtenable du système de mesure. De cette manière, l'utilité de l'emploi des convertisseurs A/N à intégration pour le traitement des signaux redressés sensibles à la phase est fondée.

URNER, G.:

Mesure de débit par corrélation — une méthodes pour fluides complexes

msr, Berlin 31 (1988) 5, pp. 221—224

La mesure de débit par corrélation est une méthode de mesure moderne et appartient aux méthodes à temps de parcours. Elle est particulièrement apte à la mesure de fluides complexes tels que mélanges polyphasés, transport de la poussière et liquides encrassés. Le choix des capteurs pour détecter les inhomogénités naturelles se trouvant en fluide a une grande influence sur les erreurs de mesure. L'auteur présente un corrélateur par polarité basé sur MC 80 et discute les problèmes de la méthode de mesure à l'aide de quelques résultats de mesure typiques.

GEHLHAAR, H.:

Mesures de débit selon la méthode à pression différentielle

msr, Berlin 31 (1988) 5, pp. 224—228

Dans un aperçu concernant la détermination de débit à l'aide de la pression différentielle mesurée, l'auteur compare brièvement les méthodes à pression dynamique avec celles-là à pression différentielle. Il s'occupe en détail du standard TGL 43549 de RDA qui se rapporte à la mesure de débit par pression différentielle. Les incertitudes de mesure plus petites aujourd'hui et les nouvelles équations de calcul sont particulièrement soulignées.

SCHILDER, K.:

Débitmètres à turbulence pour l'automatisation

msr, Berlin 31 (1988) 5, pp. 228—231

L'auteur présente le débitmètre à turbulence ursaflux W 3 et sa série de types ainsi que l'ordinateur de débit ursaflux PR supporté par microprocesseur comme une génération nouvelle de débitmètres pour la mesure sûre et économique de débits de gaz et de liquides en tubes. Le système de capteur robuste sans parties mues muni d'un capteur piézo-électrique permet une acquisition fiable et précise des taux de débit. L'auteur décrit la construction, fonction et les données techniques des appareils. Comme un example, il présente une mesure de gaz par un dispositif de mesure de débit à turbulence y compris l'évaluation par micro-ordinateur.

Neue Bücher aus der UdSSR

Hierbei handelt es sich um neue Titel aus der UdSSR, die dem sowjetischen Neuerscheinungsdienst „Novye knigi" entnommen sind. Die Bücher können über den Volksbuchhandel bestellt werden.

[1] Matematika i SAPR (Mathematik und Systeme zur automatisierten Projektierung. Übers. aus dem Franz.). Mir. 4. Quart. 1988. NK 87-28 (69).

[2] KRAKOVJAK, S.: Osnovy organizacii i funkcionirovanija OS EVM (Grundlagen der Organisation und Funktion von Operationssystemen der EDV-Anlagen. Übers. aus dem Franz.). Mir. 4. Quart. 1988. NK 87-28 (71).

[3] ARTEM'EV, V.: Lokacionnye sistemy robotov (Lokationssysteme in Robotern). Vyšejšaja škola (BSSR). 2. Quart. 1988. NK 87-29 (50).

[4] Avtomatika i vyčislitel'naja technika. Vyp. 17 (Automatik und Rechentechnik. Ausg. 17). Vyšejšaja škola (BSSR). 4. Quart. 1988. NK 87-29 (55).

[5] VIŠNJAKOV, V.: Organizacija vyčislitel'nych processov EVM i sistem (Organisation von rechentechnischen Prozessen und Systemen). Vyšejšaja škola (BSSR). 3. Quart. 1988. NK 87-29 (197).

[6] IL'IN, O.; KOZLOVSKIJ, K.; PETRENKO, JU.: Sistemy programmnogo upravlenija proizvodstvennymi ustanovkami i robototechničeskimi kompleksami (Systeme der Programmsteuerung von Produktionsanlagen und Roboterkomplexen). Vyšejšaja škola (BSSR). 4. Quart. 1988. MK 87-29 (209).

[7] Primenenie upravljajuščich vyčislitel'nych mašin (Anwendung von Steuerrechnern). Vyšejšaja škola (BSSR). 3. Quart. 1988. NK 87-29 (223).

[8] Sistemy avtomatičeskogo proektirovanija. Vyšejšaja škola (BSSR).
Band 1: NORENKOV, I.: Principy postroenija i struktura (Prinzipien des Aufbaus und der Struktur). 1. Quart. 1988. NK 87-29 (227).
Band 2: ŽUK, D.; MARTYNJUK, V.; SOMOV, P.: Tehničeskie sredstva i operacionnye sistemy (Technische Mittel und Operationssysteme). 1. Quart. 1988. NK 87-29 (228).
Band 3: FEDORUK, V.; ČERNEN'KIJ, V.: Informacionnoe i prikladnoe programmnoe obespečenie (Informationelle und angewandte Software). 1. Quart. 1988. NK 87-29 (229)
Band 4: TRUDONOŠIN, V.; PIVOVAROVA, N.: Matematičeskie modeli techničeskich ob'ektov (Mathematische Modelle technischer Objekte). 2. Quart. 1988. NK 87-29 (230).
Band 5: KUZ'MIK, P.; MANIČEV, V.: Avtomatizacija funkcional'nogo proektirovanija (Automatisierung der funktionellen Projektierung). 2. Quart. 1988. NK 87-29 (231).
Band 6: KAPUSTIN, N.; VASIL'EV, G.: Avtomatizacija konstruktorskogo i technologičeskogo proektirovanija (Automatisierung der konstruktiven und technologischen Projektierung). 3. Quart. 1988. NK 87-29 (232).
Band 7: BULDAKOVA, D.; ŽUK, D.; KUZ'MIK, P.: Laboratornyj praktikum (Laborpraktikum). 3. Quart. 1988. NK 87-29 (233).
Band 8: ŽUK, D.; KAPUSTIN, N.; KUZ'MIK, P.: Sbornik primerov i zadač (Sammlung von Beispielen und Aufgaben). 3. Quart. 1988. NK 87-29 (234).
Band 9: ŽUK, D.; KUZ'MIK, P.; MANIČEV, V.: Illjustrirovannyj slovar' (Illustriertes Wörterbuch). 4. Quart. 1988. NK 87-29 (235).

[9] AJZENBERG, L.; KIPNIS, A.; STOROŽENKO, JU.: Avtomatizacija proizvodstvennych processor i ASU v legkoj promyšlennosti (Automatisierung von Produktionsprozessen und ASU in der Leichtindustrie). Legprombytizdat. 1. Quart. 1988. NK 87-30 (571).

[10] Pakety prikladnych programm. Programmnoe obespečenie optimizacionnych zadač (Anwenderprogrammpakete. Software für Optimierungsaufgaben). Nauka. 4. Quart. 1987. NK 87-31 (21).

[11] NIKIFOROV, A.; FAZYLOV, Š.: Metody i algorithmy preobrazovenija tipov priznakov v zadačach analiza dannych (Methoden und Algorithmen zur Transformation von Kennzeichentypen in Aufgaben der Datenanalyse). Fan (UzSSR). 1. Quart. 1988. NK 87-33 (34).

[12] PULATOV, A.: Vvedenie v teoriju avtomatno-situacionnogo upravlenija (Einführung in die Theorie der Automaten-Situationssteuerung). Fan (UzSSR). 4. Quart. 1988. NK 87-33 (35).

[13] LATINOV, CH.; NOSIROV, F.: O vlijanii zapazdyvanija na nelinejnych sistem (Über den Einfluß von Totzeiten auf nichtlineare Systeme). Fan (UzSSR). 4. Quart. 1988. NK 87-33 (39).

[14] Sostojanie i razvitie gibkich proizvodstvennych sistem (Stand und Entwicklung flexibler Produktionssysteme). Meždunar. centr nauč. i techn. informacii. 3. Quart. 1988. NK 87-33 (77).

[15] SADYKOV, S.; KADYROVA, G.; AZIMOV, Š.: Sistemy cifrovoj obrabotki izobraženij (Systeme zur digitalen Verarbeitung von Abbildungen). Fan (UzSSR). 3. Quart. 1988. NK 87-33 (88).

[16] KABULOV, V.; GUS'KOV, G.; MAGRUPOV, T.: Konceptual'noe proektirovanie mikroelektronnych vyčislitel'nych struktur i sistem (Konzeptionelle Projektierung mikroelektronischer Rechnerstrukturen und Systeme). Fan (UzSSR). 3. Quart. 1988. NK 87-33 (89).

[17] ACHMETOV, K.; ISMAILOV, M.: Matematičeskoe modelirovanie i upravlenie technologičeskimi processami biochimičeskogo proizvodstva (Mathematische Modellierung und Steuerung technologischer Prozesse der biochemischen Produktion). Fan (UzSSR). 2. Quart. 1988. NK 87-33 (99).

[18] Algorithmy ekonomičeskich processov (Algorithmen ökonomischer Prozesse). Štiinca (MoldSSR). 2. Quart. 1988. NK 87-34 (33). msr 8795

Impressum

messen · steuern · regeln
Herausgeber: Kammer der Technik, Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA)
Verlag: VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201, Berlin, DDR-1020, Telegrammadresse: Technikverlag Berlin; Telefon 2 87 00; Telex: 011 222 8 techn dd
Verlagsdirektor: Dipl.-Ing. KLAUS HIERONIMUS
Redaktion: Dr.-Ing. DIETRICH WERNER, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2 87 03 62)
Dr.-Ing. JÜRGEN WEDE, Redakteur (Telefon: 2 87 03 74)
Gestaltung: KAREN WOHLGEMUTH (Telefon: 2 87 02 88)
Lizenz-Nr.: 1112 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
AN (EDV): 15 936
Erscheinungsweise: monatlich 1 Heft
Heftpreis: 4,— M, Abonnementpreis vierteljährlich 12,— M; Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebs BUCHEXPORT zu entnehmen
Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer", Bad Langensalza, 5820
Anzeigenannahme: Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigen-Annahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201, Berlin, 1020. Anzeigenpreisliste Nr. 7; Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, Hermann-Duncker-Str. 89, Berlin, DDR-1157
Rechtsvorbehalt: Nachdrucke, Übersetzungen sowie Vervielfältigung jeglicher Art von vollständigen oder auszugsweisen Text- oder Bildbeiträgen bedürfen der vorherigen schriftlichen Zustimmung des Verlages. Referate, Besprechungen und genehmigte Vervielfältigungen sind nur mit genauer Quellenangabe zulässig. Erfüllungsort ist der Sitz des Verlages in Berlin-Mitte.
Bezugsmöglichkeiten:
DDR: sämtliche Postämter
SVR Albanien: Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Bruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien: Direkzia R.E.P., 11 a, Rue Paris, Sofia
VR China: China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P.O. Box 88, Beijing
ČSSR: PNS — Ústřední Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Slezska 11, 12000 Praha 2; PNS, Ústredná Expedicia a Dovoz Tlače, Posta 002 885 47 Bratislava
SFR Jugolawien: Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarako Produzeče MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR: CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
Republik Kuba: Empresa de Comercio Exterior de Publicaciones, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana
VR Polen: C. K. P. i. W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
SR Rumänien: D.E.P. Bukureşti, Piaţa Scienteii, Bukureşti
Ungarische VR: P.K.H.I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P.O. Box 16, 1426 Budapest
UdSSR: Städtische Abteilungen von Sojuzpečat oder Postämter und Postkontore
SR Vietnam: XUNHASABA, 32, Hai Ba Trung, Hanoi
BRD und Berlin (West): ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141—167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich: Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, A-2345 Brunn am Gebirge
Schweiz: Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstraße 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder: örtlicher Buchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, Postfach 160, Leipzig, DDR-7010 und Leipzig Book Service, Talstraße 29, Leipzig, DDR-7010.

Abnahmebedingungen:
Die Redaktion veröffentlicht nur Originalbeiträge. Für Nachdrucke, Übersetzungen oder Vervielfältigungen jeglicher Art gilt der Rechtsvorbehalt. Die Redaktion behält sich Änderungsvorschläge bei der Beitragsbearbeitung vor. Die Beiträge müssen generell mit einer Veröffentlichungsfreigabe des Betriebes oder der Institution der Autoren versehen sein.

Bei der Anfertigung von Beiträgen sind unbedingt die Manuskripthinweise zu beachten. Diese sind dem Heft 1 (S. 28) eines jeweiligen Jahrganges zu entnehmen bzw. werden von der Redaktion auf Anfrage zugesandt. Die Einhaltung der Manuskripthinweise bildet die Voraussetzung für eine zügige und sachgerechte Beitragsbearbeitung.

Wissenschaftliche Tage 1988 der Technischen Universität „Otto von Guericke" Magdeburg

Im Rahmen der Wissenschaftlichen Tage 1988 der Technischen Universität „Otto von Guericke" finden unter anderem folgende Tagungen statt:

Erneuerung von Prozessen und Erzeugnissen durch Schlüsseltechnologien

31. August und 1. September 1988

Veranstalter:
TU „Otto von Guericke" Magdeburg

Anerkannte Natur-, Technik- und Gesellschaftswissenschaftler des In- und Auslandes diskutieren mit Praxispartnern über disziplinäre und interdisziplinäre Probleme und Ergebnisse bei der Entwicklung und Anwendung von Schlüsseltechnologien.
Schwerpunkte:
- innovative Produktionsplanung und Produktionssteuerung
- flexible rechnerintegrierte automatisierte Fertigung — ein Beitrag zum Betrieb der Zukunft
- Entwicklung von Hochleistungserzeugnissen, -prozessen und -verfahren
- der Apparate- und Anlagenbau aus der Sicht der Biotechnologie und des Umweltschutzes
- Schlüsseltechnologien und ökonomische Effekte

6. Fachtagung „Elektrotechnologie"

13. und 14. September 1988

Veranstalter:
Sektion Automatisierungs- und Elektrotechnik und die Wissenschaftliche Sektion Elektrotechnologie der KDT

Die Fachtagung „Elektrotechnologie" informiert über den Entwicklungsstand und die Bedingungen der technologischen Verfügbarkeit interdisziplinärer Leistungen der Naturwissenschaften, der Elektrotechnik und des Maschinenbaus für neue technologische Lösungen und Erzeugnisse. Dabei werden Einsatzerfahrungen im Umgang mit neuen Bearbeitungsverfahren vermittelt.
Schwerpunkte:
- Elektrowärmetechnologien
  (Stoff- und Teilebehandlung, rationeller Energieeinsatz, Anlagentechnik, CAM-Elektronik)
- Lichtbogentechnologien
  (Lichtbogenphysik, Prozeßanalyse, elektronische Stromquellen, Steuerungen)
- Elektrobearbeitungstechnologien
  (Verfahren, Verfahrenselektronik, Anlagen, Fertigungsplanung/-programmierung)
- Strahltechnologien
  (Laser-, Elektronen- und Plasmatechnik, Produktionsverfahren)
- Metallurgische Beschichtungstechnologien
  (Galvano-, Bedampfungs-, Sputter- und Plasmaspritztechnik — alternative Wertung)

Auskünfte erteilt:
Technische Universität
„Otto von Guericke" Magdeburg
Tagungsbüro
Postschließfach 124
Magdeburg
3010
Tel.: 592209

6. Fachtagung Standardisierung

Die o. g. wissenschaftlich-technische Veranstaltung wird unter dem Titel „Beitrag zur beschleunigten Einführung der Schlüsseltechnologien sowie Qualitätsbewertung und Zertifizierung von Erzeugnissen der Elektrotechnik/Elektronik auf Basis internationaler Standards" vom 10. bis 11. November 1988 in Leipzig, Brühlzentrum, durchgeführt.

Veranstalter:

Fachverband Elektrotechnik in der Kammer der Technik.
Kommission Standardisierung

Inhaltliche Schwerpunkte:

1. Beitrag zur beschleunigten Einführung der Schlüsseltechnologien
   - CAD, CAM, CAQ
   - Probleme der Softwarestandardisierung in der DDR
   - Lichtwellenleiter-Nachrichtenübertragung
2. Beitrag der Standardisierung zur Verbesserung der Devisenrentabilität im Außenhandel
   - Mitarbeit der DDR im RGW, der IEC, der ISO und anderen internationalen Organisationen
   - Mitwirkung in internationalen Zertifizierungsorganen
   - Information der Kunden über erworbene Zertifikate mittels Messen, Ausstellungen, Katalogen, Verpakkungen, Inseraten, Betriebsanleitungen.

Zu diesen Schwerpunkten werden Vorträge bis zum
15. Juni 1988
entgegengenommen.

Teilnahmemeldungen sind schriftlich an folgende Anschrift zu richten:

Kammer der Technik
— Präsidium —
Fachverband Elektrotechnik
Clara-Zetkin-Str. 115/117
Berlin
DDR-1086
Tel.: 2265231

Internationales Messesymposium „Messen und Prüfen in der chemischen Industrie"

Die Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der Kammer der Technik der Deutschen Demokratischen Republik veranstaltet gemeinsam mit dem Kombinat VEB Carl Zeiss JENA
VEB Kombinat ROBOTRON
VEB Kombinat Automatisierungsanlagen
VEB Kombinat Elektro-Apparate-Werke „Friedrich Ebert"
VEB Kombinat Medizin- und Labortechnik
und anderen Industriekombinaten der DDR während der Leipziger Herbstmesse 1988 vom 8. bis 9. September 1988 in Leipzig/DDR das o. g. Internationale Messesymposium.
Namhafte Wissenschaftler und Praktiker referieren zu den inhaltlichen Schwerpunkten der Meß- und Prüftechnik in der chemischen Industrie auf den Gebieten der

- Prozeßautomatisierung
- Sensoren und Sensorsysteme für Meßgrößen in der chemischen Industrie
- Chromatografie
- Flüssigkeits- und Gasanalyse
- pH-Wert-Messung
- Spektralanalyse.

Thema der Podiumsdiskussion:

Prozeßautomatisierung in der chemischen Industrie.

Tagungssprachen:
Deutsch, Englisch, Russisch
Tagungsort:
Leipzig (Leipzig-Information, Sachsenplatz)
Organisationsbüro:
Das Organisationsbüro befindet sich bis Tagungsbeginn in der
Kammer der Technik
— WGMA —
Postfach 1315
Berlin
DDR-1086
Telefon: 2265304, 2265218
Telex: 0114841 dd,
von Tagungsbeginn bis Tagungsende am Tagungsort.

10. Internationale Fachtagung Galvanotechnik

Die o. g. wissenschaftlich-technische Veranstaltung wird vom 3. bis 5. Mai 1989 in Berlin durchgeführt.

Veranstalter:

Fachverband Elektrotechnik in der KDT; FA Galvanotechnik; Arbeitsausschüsse Galvanotechnik Halle/Leipzig, Berlin; Kombinat VEB LEW „Hans Beimler" Hennigsdorf

Inhaltliche Schwerpunkte:

1. Optimierung des komplexen galvanischen Beschichtungsprozesses
2. Neue Verfahren der Hochleistungsgalvanik
3. Galvanische Abscheidung in der Mikroelektronik

Zu diesen Schwerpunkten werden Vorträge bis zum 20. Juni 1988 entgegengenommen.

Teilnahmemeldungen sind schriftlich an folgende Anschrift zu richten:

Kammer der Technik — Präsidium —
Fachverband Elektrotechnik
Clara-Zetkin-Str. 115/117
Berlin, DDR-1086
Tel.: 2265231

ISSN 0026-0347, mess., steuern, regeln
Berlin 31 (1988) 5, S. 193—240

15036 5 159 549 064
APW
4073 7001 1910 SHAT 11

Neuerscheinungen

Angewandte Akustik
Band 1

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kraak und Prof. Dr. sc. techn. Günther Schommartz

Reihe Angewandte Akustik. 280 Seiten, 149 Bilder, 10 Tafeln, Broschur, DDR 35,— M, Ausland 42,— DM. Bestellangaben: 5537186/Angewandte Akustik Bd. 1

Die Bände dieser neuen Reihe berichten in Übersichten und Beiträgen monographischen Charakters über aktuelle Probleme, Fortschritte und Tendenzen auf allen Gebieten der Akustik. Sie dienen damit auch einer Integration der in vielen Disziplinen tätigen Akustiker.
In loser Folge sollen jährlich 1 bis 2 Bände erscheinen.
Band 1 enthält 10 Beiträge, u. a. über Schallintensitätsmeßtechnik, objektive Qualitätsbeurteilung von Lautsprechern, Raumakustik neuer Saalbauten, LPC — eine Signaltransformation für die Digitaltechnik, Entwurf mikroakustischer Bauelemente, Informationskapazität zur Gehörschadensforschung.

Rechnergestützte Fertigungssteuerung
Mathematische Methoden

Von einem Autorenkollektiv unter Federführung von Dr. sc. techn. Dr. rer. nat. Werner Stanek

388 Seiten, 154 Bilder, 34 Tafeln, Kunstleder, DDR 48,— M, Ausland 56,— DM. Bestellangaben: 5535631/Stanek, Fertigung

Rechnergestützte Fertigungsprozesse gewinnen in der Industrie immer stärker an Bedeutung. Durch die sprunghafte Entwicklung der Mikroelektronik und Rechentechnik sind die Möglichkeiten des Rechnereinsatzes erheblich gestiegen. Dafür ist aber die erforderliche Software zu entwickeln. Voraussetzung hierfür ist die Modellierung, Simulation und Optimierung von Aufgaben der Fertigungssteuerung.
Im Buch wird das mathematische Rüstzeug für die Fertigungsplanung, Fertigungsdisposition sowie Steuerung und Überwachung der Fertigung bereitgestellt. Es ist sowohl für Wissenschaftler und Praktiker auf dem Gebiet der Projektierung und Steuerung von Fertigungsprozessen als auch für die Ausbildung in den entsprechenden Fachrichtungen geeignet.

Nachauflagen

Informationstechnik
Signal · System · Information

Von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Eugen-Georg Woschni. 3., stark bearbeitete Auflage. 392 Seiten, 314 Bilder, 46 Tafeln, Leinen, DDR 28,— M, Ausland 44,— DM. Bestellangaben: 5537493/Woschni, Inform. technik

Das Hochschullehrbuch behandelt die theoretischen Grundlagen der Informationstechnik: die Signaltheorie, Systemtheorie sowie Kodierung und Modulation. Zahlreiche Übungsaufgaben und deren Lösungen machen das Buch zu einem wertvollen Arbeitsmittel.
In der stark bearbeiteten Auflage sind neuere Entwicklungen auf den Gebieten der Mikroelektronik und Rechentechnik berücksichtigt worden.

Analoge Systeme
Grundlagen

Von Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Wunsch und Dr. sc. techn. Helmut Schreiber. 2., durchgesehene Auflage. 238 Seiten, 220 Bilder, 7 Tafeln, Kunstleder, DDR 18,— M, Ausland 28,— DM. Bestellangaben: 5538963/Wunsch, Analoge Systeme

Dieses Hochschullehrbuch vermittelt die allgemeine Theorie der Systeme mit analogen Eingangs-, Ausgangs- und Systemgrößen.

Von den gleichen Autoren bereits lieferbar in 2., durchgesehener Auflage: **Stochastische Systeme** *Grundlagen. 176 Seiten, 111 Bilder, Leinen, DDR 13,— M, Ausland 25,— DM. Bestellangaben: 5533257/Wunsch, Stochast. Systeme*

Auslieferung in diesen Tagen durch den Fachbuchhandel

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN